



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO

CAMPUS DIADEMA

BEATRIZ MILZ

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA E MAPEAMENTO
POR SENSORIAMENTO REMOTO (LANDSAT-8/OLI) DO
COMPARTIMENTO AMBIENTAL CORPO CENTRAL I DA
REPRESA BILLINGS (SÃO PAULO, SP)**

DIADEMA

2018

BEATRIZ MILZ

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA E MAPEAMENTO POR
SENSORIAMENTO REMOTO (LANDSAT-8/OLI) DO
COMPARTIMENTO AMBIENTAL CORPO CENTRAL I DA REPRESA
BILLINGS (SÃO PAULO, SP)**

Dissertação apresentada, como exigência parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Análise Ambiental Integrada do Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas da Universidade Federal de São Paulo – Campus Diadema.

DIADEMA

2018

BEATRIZ MILZ

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA E MAPEAMENTO POR
SENSORIAMENTO REMOTO (LANDSAT-8/OLI) DO
COMPARTIMENTO AMBIENTAL CORPO CENTRAL I DA REPRESA
BILLINGS (SÃO PAULO, SP)**

Dissertação apresentada, como exigência parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Análise Ambiental Integrada do Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas da Universidade Federal de São Paulo – Campus Diadema.

Orientador 1:

Prof.^a Dr.^a Cristina Souza Freire Nordi

Orientador 2:

Prof.^a Dr.^a Ana Luisa Vietti Bitencourt

DIADEMA

2018

Milz, Beatriz

Avaliação da Qualidade da água e Mapeamento por Sensoriamento Remoto (LANDSAT-8/OLI) do Compartimento Ambiental Corpo Central I da Represa Billings (São Paulo, SP)". / Beatriz Milz. – —Diadema, 2018.

108 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências - Programa de Pós-Graduação em Análise Ambiental Integrada) - Universidade Federal de São Paulo - Campus Diadema, 2018.

Orientador 1: Cristina Souza Freire Nordi

Orientador 2: Ana Luísa Vietti Bitencourt

1. Índice de Estado Trófico. 2. Parâmetros ambientais. 3. Geoprocessamento. 4. Uso da terra. 5. Reservatório. I. Título.

CDD 628.161



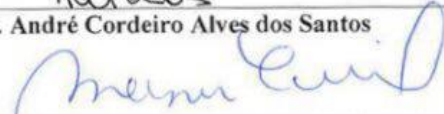
Serviço Público Federal
Universidade Federal de São Paulo
Pró – Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa

Em face dos referidos pareceres, a Comissão Julgadora considera o aluno(a) **BEATRIZ MILZ** APROVADO (Aprovado/Reprovado) a receber o título de **MESTRE EM CIÊNCIAS** pela UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO. E, por estarem de acordo, assinam a presente ata.

São Paulo, 21 de maio de 2018.



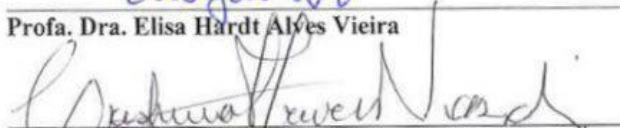
Prof. Dr. André Cordeiro Alves dos Santos



Prof. Dr. Werner Siegfried Hanisch



Profa. Dra. Elisa Hardt Alves Vieira



Profa. Dra. Cristina de Souza Freire Nordi

Agradecimentos

Agradeço a Universidade Federal de São Paulo e ao Programa de Pós-graduação em Análise Ambiental Integrada, pela oportunidade de aprendizagem e crescimento acadêmico e pessoal.

Agradeço as professoras doutoras Cristina Souza Freire Nordi e Ana Luísa Vietti Bitencourt, por me orientarem no mestrado.

Agradeço a minha família, por todo apoio que me foi dado ao longo da minha vida, que me possibilitou dedicar-me aos estudos, principalmente minha mãe Antônia Regina Alves da Silva, meu pai Cláudio Milz, e minha avó Dagmar Milz. Obrigada por acreditarem no meu potencial.

Agradeço meus companheiros do Laboratório de Ecofisiologia e Monitoramento Ambiental da UNIFESP/Diadema: Matheus Santos Freitas Ribeiro, Fellipe Henrique Martins Moutinho, Luiza Gonçalves Lazzaro, Bruna Araújo dos Reis, Matheus Peres Matarazzo, Patrícia Oliveira de Aquino, Cristiane Gonçalves da Silva, Lenin Luis de Jesus, Cinthia Ferreira da Silva, Larissa Rossi. Obrigada pelos ensinamentos, companhia, participação em coletas e auxílio nas análises em laboratório.

Agradeço ao Prof. Dr. Luis Mauricio Bini e Dr. Jean Carlo Gonçalves Ortega, da Universidade Federal de Goiás (UFG) pelo auxílio com as análises estatísticas.

Agradeço ao Núcleo de Ecologia do Instituto de Botânica de São Paulo, à Prof.^a Dr.^a Denise Bicudo e a Prof.^a Dr.^a Carla Ferragut pelos ensinamentos passados na disciplina de Ecossistemas Aquáticos Continentais. Agradeço também aos alunos de pós-graduação que realizaram comigo a disciplina pela companhia e ensinamentos.

Agradeço a Prof.^a Dr.^a Elisa Hardt, ao Prof. Dr. Prof. André Cordeiro Alves dos Santos e ao Prof. Dr. Werner Siegfried Hanisch pela participação na banca de defesa

de mestrado, apresentando sugestões e colocações importantíssimas para o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP) pelo fornecimento dos dados meteorológicos.

Agradeço a Empresa Metropolitana de Águas e Energia (EMAE) pelo fornecimento de dados referentes ao funcionamento da Usina Elevatória de Pedreira e da represa Billings.

Agradeço ao Luca Congedo, por disponibilizar diversos materiais sobre a utilização do Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), e por tirar as dúvidas quando necessário.

Agradeço à Professora Andréia Silva, por ser mais do que uma educadora física, e sim uma amiga especial. Em momentos difíceis sua companhia, conselhos e aulas foram essenciais para mim.

Agradeço meus amigos, por estarem ao meu lado durante este processo, e sempre me incentivarem a continuar. Não conseguiria agradecer a todos, mas meu agradecimento e carinho especial para Luiza Lazzaro, Matheus Ribeiro, Mariana Xavier de Carvalho, Glauber Narcizo, Beatriz Nina Murari de Macedo, Rafael Mamédio e Dr^a Angela Maria Branco.

Agradeço a Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo e ao curso de Gestão Ambiental, que me ofereceram durante a graduação uma formação interdisciplinar que foi imprescindível para o meu desenvolvimento acadêmico. Agradeço também à Beatriz Nina Murari de Macedo e ao Prof. Dr. Pedro Roberto Jacobi, que durante a graduação foram companheiros no início da minha trajetória nos estudos sobre a represa Billings.

Agradeço a todos que, de alguma forma, me ajudaram nessa trajetória.

RESUMO

Introdução: A represa Billings é o maior reservatório de água da Região Metropolitana de São Paulo, é utilizado para abastecimento público, porém apresenta águas de baixa qualidade resultante principalmente da poluição proveniente da reversão dos rios Pinheiros e Tietê e da ocupação desordenada de sua bacia hidrográfica.

Objetivos: A pesquisa teve como objetivo avaliar a qualidade das águas do Corpo Central I da represa Billings, e relacionar com as características de uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica na qual está inserida. **Metodologia:** O mapeamento de uso e cobertura da terra foi realizado utilizando imagens do satélite Landsat-8/OLI, no

software Quantum GIS a partir do Semi-Automatic Classification Plugin. Foi gerado um mapa de uso e cobertura da terra para áreas terrestres e quatro mapas de classificação para as áreas de represa. As coletas de água foram realizadas na superfície, em quatro pontos de coleta e em dois períodos diferentes: estiagem (ago/2016 e ago/2017) e chuvoso (jan/2017 e fev/2018). As variáveis analisadas foram temperatura, oxigênio dissolvido, potencial hidrogeniônico, condutividade elétrica, clorofila-a, nutrientes (fósforo e nitrogênio), e foi calculado o Índice de Estado Trófico.

A análise estatística dos resultados limnológicos foi realizada utilizando uma análise de interação espaço-tempo. **Resultados:** O mapeamento do uso e cobertura da terra no compartimento ambiental Corpo Central I evidenciou que a classe predominante é a de área urbana. Altas concentrações de nutrientes foram obtidas no ponto próximo à reversão do rio Pinheiros, intensificadas no período chuvoso. A aplicação do Índice de Estado Trófico mostrou que as águas do Corpo Central I foram classificadas como Hipereutróficas, evidenciando a degradação da qualidade das águas neste compartimento. **Conclusões:** A reversão do rio Pinheiros é um fator determinante na degradação da qualidade das águas superficiais do Corpo Central I. A variação sazonal influenciou os parâmetros físicos, químicos e biológicos de qualidade das águas do Corpo Central I.

Palavras-chaves: Índice de Estado Trófico, Parâmetros ambientais, Geoprocessamento, Uso da terra, Reservatório.

ABSTRACT

Introduction: The Billings reservoir is the largest reservoir of water in the Metropolitan Region of São Paulo, and its used for public supply, but has low water quality resulting mainly from pollution that comes from the Pinheiros and Tietê rivers, and the disordered occupation of its watershed. **Objectives:** The study aimed to evaluate the quality of the water on the Central Body I of Billings reservoir and relate to the characteristics of land use and cover in its watershed. **Methods:** Land use and cover mapping was performed using Landsat-8/OLI satellite imagery in the *software* Quantum GIS and the Semi-Automatic Classification Plugin. A land use and cover classification map were generated for land areas, and four classification maps for reservoir areas. Water was sampled on the surface in four sampling points, at two different periods: dry (Aug/2016, Aug/2017) and rainy (Jan/2017 and Feb/2018). The variables analyzed were temperature, dissolved oxygen, pH, electrical conductivity, chlorophyll-a, nutrients (phosphorus and nitrogen), and the Trophic State Index was calculated. The statistical analysis of the limnological results was performed using a space-time interaction analysis. **Results:** The mapping of land use and cover in the Central Body I showed that the predominant class is the urban area. High concentrations of nutrients were obtained at the point near the reversal of the Pinheiros River, intensified during the rainy season. The application of the Trophic State Index showed that the waters of the Central Body I were classified as Hypereutrophic, evidencing the degradation of the water quality in this compartment. **Conclusions:** The reversion of the Pinheiros River is a determining factor in the degradation of the quality of surface waters of the Central Body I. The seasonal variation influenced the physical, chemical and biological variables of the water quality of the Central Body I.

Key-words: Trophic State Index, Environmental Parameters, Geoprocessing, Land Use, Reservoir.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Localização da Área de Proteção e Recuperação de Mananciais da Bacia Hidrográfica do Reservatório Billings (APRM-B), e seus respectivos compartimentos ambientais.....	25
Figura 2 – Fluxograma metodológico de coleta de dados.....	28
Figura 3 – Fluxograma metodológico de processamento e análise dos dados.....	29
Figura 4 - Esquema metodológico utilizado para coleta e análise de águas superficiais do Corpo Central I da represa Billings.....	35
Figura 5 - Climograma de São Paulo - SP a partir de dados da Estação Meteorológica do IAG-USP.....	36
Figura 6 - Localização do: a) Estado de São Paulo; b) Área de Proteção e Recuperação de Mananciais da Bacia Hidrográfica do Reservatório Billings (APRM-B); c) Compartimentos ambientais da APRM-B; d) Compartimento ambiental Corpo Central I e pontos de coleta.....	38
Figura 7 – Usina Elevatória de Pedreira, localizada no município de São Paulo - SP.	39
Figura 8 – Vazão Bombeada pela Usina Elevatória de Pedreira para o reservatório Billings, no ano de 2016.	40
Figura 9 – a) Distribuição da precipitação diária na data da coleta, e precipitação acumulada em 5 e 30 dias anteriores à coleta, e b) Distribuição da temperatura média na data das coletas, na Estação Meteorológica do IAG-USP (São Paulo, SP).....	44
Figura 10 – Gráficos de: a) Profundidade máxima (Zmax), profundidade da zona eufótica (Zeu) e profundidade do disco de Secchi (DS), e dados de superfície de: b) Saturação (%) de Oxigênio Dissolvido; c) Potencial Hidrogeniônico (pH); d) Condutividade Elétrica, no Corpo Central I da represa Billings.	45
Figura 11 - Perfil de Temperatura e Oxigênio Dissolvido nos pontos amostrados no Corpo Central I da represa Billings, em quatro coletas (2016-2018).....	47
Figura 12 - Concentrações médias dos nutrientes: nitrogênio total (NT), nitrato (N-NO_3^-), nitrito (N-NO_2^-), nitrogênio amoniacal (N-NH_4^+), fósforo total (PT), fósforo total dissolvido (PTD) e ortofosfato (PSR), e de clorofila-a e índice de Estado Trófico para reservatórios tropicais/subtropicais (TSI-trs), na superfície d'água dos pontos amostrados na represa Billings, em quatro coletas.....	48

Figura 13 - Mapa da hidrografia e enquadramento dos corpos hídricos, conforme Decreto 10.755/77 – UGRHI 6 – Alto Tietê.	61
Figura 14 – Florações de a) macrófitas, e b) fitoplâncton, na represa Billings.	65
Figura 15 – Distribuição da precipitação mensal acumulada entre os meses de junho de 2016 e fevereiro de 2018, e precipitação mensal histórica (média 1933-2002), na Estação Meteorológica do IAG-USP (São Paulo, SP).....	68
Figura 16 – Distribuição da temperatura média mensal entre os meses de junho de 2016 e fevereiro de 2018, e temperatura mensal histórica (média 1933-2002), na Estação Meteorológica do IAG-USP (São Paulo, SP).....	69
Figura 17 – Resumo metodológico: fluxograma de elaboração dos mapas.....	76
Figura 18 - Delimitação das microbacias hidrográficas correspondentes ao Corpo Central I da represa Billings, resultante da aplicação do algoritmo “ <i>r.Watershed</i> ”. ...	77
Figura 19 - Mapa de uso e cobertura da terra para as áreas terrestres das microbacias delimitadas pertencentes ao Corpo Central I da represa Billings.	79
Figura 20 –Área ocupada em km ² por cada classe de uso e cobertura da terra, e segundo as microbacias pertencentes ao Corpo Central I da represa Billings.	81
Figura 21 - Mapa da classificação do corpo hídrico, referente ao Corpo Central I da represa Billings, no período de estiagem/2016 ao período chuvoso de 2018.	82
Figura 22 - Área, em km ² , ocupada por cada classe, referente à classificação do corpo hídrico no Corpo Central I da represa Billings.	83
Figura 23 – Mapa da classificação de uso e cobertura da terra na microbacia que compreende o Corpo Central I da APRM-Billings com adição das concentrações de Nitrogênio Total obtidas nos quatro períodos de coleta.	85
Figura 24 - Mapa da classificação de uso e cobertura da terra na microbacia que compreende o Corpo Central I da APRM-Billings com adição das concentrações de Fósforo Total obtidas nos quatro períodos de coleta.	86
Figura 25 – Mapa da classificação de uso e cobertura da terra na microbacia que compreende o Corpo Central I da APRM-Billings com adição das concentrações de Clorofila-a obtidas nos quatro períodos de coleta.	87
Figura 26 – Mapa da classificação de uso e cobertura da terra na microbacia que compreende o Corpo Central I da APRM-Billings com adição das concentrações de Nitrito obtidas nos quatro períodos de coleta.	88

Figura 27 – Mapa da classificação de uso e cobertura da terra na microbacia que compreende o Corpo Central I da APRM-Billings com adição das concentrações de Nitrogênio Amoniacal obtidas nos quatro períodos de coleta.....	89
Figura 28 – Ocupação irregular conhecida como “Morro dos Macacos”, município de São Paulo.....	91
Figura 29 – Macrófitas flutuantes na superfície das águas do Corpo Central I da represa Billings, 02/08/2017.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Municípios que compõem a Área de Proteção e Recuperação dos Mananciais da Bacia Hidrográfica do Reservatório Billings (APRM-B): área, população, densidade demográfica e PIB.	22
Tabela 2 – Dados de saneamento básico para os municípios pertencentes à área de estudo, em 2016.....	25
Tabela 3 - Padrões de qualidade da água doce estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005.	33
Tabela 4 - Pontos de coleta de amostras de águas superficiais do Compartimento Ambiental Corpo Central I, o município onde o ponto está inserido, e característica principal.....	37
Tabela 5 - Nutrientes determinados com seus respectivos limites de detecção (L.D.) e quantificação (L.Q.) calculados em laboratório, unidade e referência.....	41
Tabela 6 - Classificação do Índice de Estado Trófico para reservatórios tropicais/subtropicais (TSI-tsr):.....	42
Tabela 7 – Parâmetros analisados, unidade de medida, menor e maior valor encontrado e médias para os períodos de estiagem e chuvoso (valores acima de LD e LQ).	49
Tabela 8 – Matriz de correlação dos parâmetros. Valores em negrito foram significativos. NT: Nitrogênio Total; NO2: Nitrito; NO3: Nitrato; NH4: Nitrogênio Amoniacal; PT: Fósforo Total; PTD: Fósforo Total Dissolvido; CHLA: Clorofila-a; DS: Profundidade do Disco de Secchi; T_agua: Temperatura da superfície da água; OD: Oxigênio Dissolvido; pH: Potencial Hidrogeniônico; CE: Condutividade Elétrica; PREC_30D: Precipitação nos 30 dias anteriores à coleta.	50
Tabela 9 - Efeito dos pontos e meses de coleta na variação dos parâmetros físicos, químicos e biológicos. S: pontos de coleta; T: período de coleta. Valores de F em negrito foram significativos.	52
Tabela 10 - Comparação dos resultados obtidos no Corpo Central I da represa Billings e a conformidade (verde) e não-conformidade (vermelho) com os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/2005 para corpos hídricos de Classe II.	53

Tabela 11 – Diferentes estudos realizados na represa Billings e as principais não conformidades referentes aos parâmetros estabelecidos na Resolução CONAMA 357/2005.	59
Tabela 12 – Datas de coleta, período de referência e a respectiva data e ID da imagem Landsat-8 utilizada neste trabalho.....	67
Tabela 13 - Classes de uso e cobertura da terra utilizadas no mapeamento das microbacias hidrográficas que abrangem o compartimento ambiental Corpo Central I da represa Billings.....	73
Tabela 14 - Classes de uso e cobertura do corpo hídrico utilizadas no mapeamento do compartimento ambiental Corpo Central I da represa Billings, realizado neste estudo.	74
Tabela 15 – Microbacias delimitadas pertencentes ao Corpo Central I da represa Billings e a área ocupada, e municípios a qual pertencem.	78
Tabela 16 - Área, em km ² e em porcentagem, ocupada por cada classe de uso e cobertura da terra, para a classificação terrestre da área de estudo (Corpo Central I da represa Billings), separadas por microbacia.....	80
Tabela 17 – Pontos de coleta de amostras de água e microbacias sob a qual é influenciado, e o respectivo uso e cobertura da terra predominante.	83

LISTA DE SIGLAS

ABCD	Santo André, São Bernardo, São Caetano e Diadema
ANA	Agência Nacional de Águas
ANOVA	Análise de Variância
APRM-B	Área de Proteção e Recuperação dos Mananciais da Bacia Hidrográfica do Reservatório Billings
CE	Condutividade Elétrica
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Chl-a	Clorofila-a
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CPLEA/SMA	Coordenadoria de Planejamento Ambiental da Secretaria Estadual de Meio Ambiente (SP)
DATAGEO-SP	Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do Estado de São Paulo
DOS1	<i>Dark Object Subtraction</i>
DS	Disco de Secchi
EMAE	Empresa Metropolitana de Águas e Energia
EMPLASA	Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano
GRASS GIS	<i>Geographic Resources Analysis Support System</i>
IAG/USP	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo
IET	Índice de Estado Trófico
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LANDSAT	<i>Land Remote Sensing Satellite</i>
LD	Limite de detecção
LQ	Limite de quantificação
MAXVER	Máxima Verossimilhança
MDE	Modelo Digital de Elevação
N-NH₄⁺	Amônio
N-NO₂⁻	Nitrito
N-NO₃⁻	Nitrato
NT	Nitrogênio Total

OD	Oxigênio Dissolvido
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PT	Fósforo Total
PTD	Fósforo Total Dissolvido
PSR	Fósforo Solúvel Reativo
QGIS	Quantum GIS
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
ROI	<i>Regions of Interest</i>
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SCP	<i>Semi-Automatic Classification Plugin</i>
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SMA	Secretaria de Meio Ambiente
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
STI	Análise de interação espaço-tempo
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
T	Temperatura
TSI-tsr	Índice de Estado Trófico para reservatórios tropicais/subtropicais
UGRHI	Unidade de gerenciamento de recursos hídricos
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
UTM	Universal Transversa de Mercator
WGS 1984	<i>World Geodetic System 1984</i>
Zmax	Profundidade máxima da coluna d'água
Zeu	Zona eufótica

SUMÁRIO

1 Introdução.....	19
2 Área de estudo	22
2.1 Represa Billings.....	22
2.2 Compartimento Ambiental Corpo Central I	24
3 Objetivos e Hipóteses	26
4 Metodologia geral.....	27
5 Capítulo I – Parâmetros de qualidade das águas superficiais do Corpo Central I da Represa Billings (São Paulo, SP).....	30
5.1 Introdução.....	31
5.2 Materiais e Métodos.....	34
5.2.1 Coleta de dados	35
5.2.2 Análise dos dados e amostras coletadas	41
5.3 Resultados	43
5.3.1 Precipitação e Temperatura do ar	43
5.3.2 Dados coletados in situ	44
5.3.3 Análises Estatísticas	50
5.3.4 Conformidade com a Resolução CONAMA nº 357/2005	52
5.4 Discussão	53
5.5 Conclusões	62
6 Capítulo II – Mapeamento do uso e ocupação da terra e da vegetação aquática do Corpo Central I da Represa Billings: sua relação com a qualidade da água.....	63
6.1 Introdução.....	64
6.2 Materiais e Métodos.....	66
6.2.1 Coleta de dados	66
6.2.2 Processamento e análise dos dados.....	69
6.2.3 Parâmetros de qualidade da água	76

6.3 Resultados.....	76
6.3.1 Delimitação das microbacias.....	76
6.3.2 Classificação de áreas terrestres	78
6.3.3 Classificação do corpo hídrico	81
6.3.4 Integração de dados espaciais e parâmetros de qualidade da água	83
6.4 Discussão	90
6.5 Conclusões	95
7 Conclusões gerais e perspectivas futuras.....	97
REFERÊNCIAS.....	99

1 Introdução

A disponibilidade de água doce de boa qualidade em fontes superficiais e subterrâneas é estratégica para os seres vivos, incluindo-se as populações humanas, sendo a sustentabilidade dos ciclos no planeta e a economia dependentes deste recurso (TUNDISI, 2003).

No Brasil, grandes represas foram construídas a partir do século XX para atender a maior demanda de água da população, que surgiu a partir do desenvolvimento industrial e socioeconômico, principalmente com relação a geração de energia elétrica (ESTEVES, 2011). Atualmente, muitos desses ecossistemas artificiais atendem demandas além da geração de energia elétrica, como a navegação, recreação, controle de enchentes, regularização de cursos e principalmente o abastecimento público (ESTEVES, 2011).

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) é a maior do Brasil, com uma população de aproximadamente 21,4 milhões de habitantes (EMPLASA, 2018), e é composta por 39 municípios. Grande parte do seu abastecimento é dependente dos reservatórios, sendo que o abastecimento público da RMSP é operado pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), por meio de oito sistemas produtores de água: Cantareira, Guarapiranga, Rio Grande, Rio Claro, Alto Tietê, Alto Cotia, Baixo Cotia e Ribeirão da Estiva, formando o “Sistema Integrado Metropolitano”, responsável pela produção de 68,2 mil m³/s de água [AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 201-]. Apesar disso, entre os anos 2013 e 2015 a RMSP vivenciou uma crise hídrica (JACOBI, CIBIM & SOUZA, 2015), causando restrições no abastecimento de água para a população.

Nos anos de 2013 e 2015 a RMSP passou por uma crise hídrica, quando o abastecimento de água para a população sofreu interrupções e inconsistência no fornecimento (IDS & LABGEO, 2017). Durante essa crise hídrica a represa Billings foi importante para a manutenção do abastecimento público desta região para atender a demanda de outras regiões por meio de transposições de água para outros sistemas (Guarapiranga e Alto tietê) (SABESP, 2015).

A represa Billings é utilizada para abastecimento público da região do ABC paulista desde 1958, através do braço Rio Grande. Em 1982, a SABESP construiu uma barragem para segregar as águas do braço do Rio Grande, onde era realizado a

adução de água para abastecimento público, com a finalidade de evitar uma maior degradação dessas águas devido à poluição (SABESP, 2017) proveniente das reversões dos rios Pinheiros e Tietê (CAPOBIANCO & WHATELY, 2002).

Portanto, a represa Billings é um reservatório fundamental para o abastecimento público da RMSP, considerando que o Sistema Rio Grande faz parte da represa Billings, e que a SABESP transpõe as águas da represa Billings para os sistemas Alto Tietê e Guarapiranga (CAPOBIANCO & WHATELY, 2002; SABESP, 2015).

Cardoso-Silva *et al.* (2014) estudaram a qualidade das águas de todos os braços da represa Billings e concluíram que as suas águas superficiais apresentam auto grau de eutrofização. Segundo Esteves (2011, p. 625), “a eutrofização é o aumento da concentração de nutrientes - especialmente fósforo e nitrogênio - em um dado ecossistema aquático, que tem como consequência o aumento da produtividade de diversos de seus compartimentos e alterações diversas sobre seu funcionamento”. A eutrofização pode ser natural ou artificial (quando é induzido por atividades antrópicas), e neste processo ocorrem modificações nas condições físicas e químicas do meio e no nível de produção do sistema (ESTEVES, 2011).

Uma das consequências da eutrofização é o crescimento excessivo de algas, cianobactérias e plantas aquáticas (VON SPERLING, 2005). Dependendo da quantidade de nutrientes, capacidade de autodepuração do corpo d’água e intensidade de insolação, as algas e cianobactérias podem atingir superpopulações, conhecido como floração. As florações constituem-se em uma camada destes microrganismos na superfície d’água e que trazem várias consequências (VON SPERLING, 2005).

Para compreensão do processo de eutrofização é importante considerar a bacia hidrográfica na qual o ecossistema hídrico está inserido. Os impactos em bacias hidrográficas não acontecem isoladamente, e sim são resultados da integração de efeitos dos diferentes usos do solo e da água (TUCCI, 2006). Em situações de falta de coleta e tratamento de esgotos, o mesmo é destinado a corpos hídricos, contribuindo então para o aporte de nutrientes nos reservatórios. Em áreas urbanas, principalmente quando há uma ocupação irregular do território, este problema é intensificado. Portanto, o uso e cobertura da terra podem estar associados ao processo de eutrofização (CARDOSO-SILVA *et al.*, 2014).

Tucci (2006) argumenta que os principais problemas relacionados com a ocupação do espaço e impactos associados aos recursos hídricos são:

“(a) expansão irregular que ocorre sobre as áreas de mananciais de abastecimento humano, comprometendo a sustentabilidade hídrica das cidades; (b) À medida que a população aumenta e se concentra em áreas urbanas, explora ao limite a disponibilidade hídrica, produz efluentes sanitário, industrial e pluvial; (c) Os efluentes não são tratados, inviabilizando o uso da água dos rios (Ciclo de contaminação) [...]; (d) as áreas urbanas são impermeabilizadas e o escoamento dos pequenos riachos canalizados. O resultado deste processo é o aumento da erosão do solo e aumento da magnitude e frequência da ocorrência das inundações com grandes prejuízos.” (TUCCI, 2006, p. 112)

Considerando a importância da cobertura da terra para a qualidade das águas dos reservatórios, é necessário que seja estudado o território das bacias hidrográficas, a fim de fundamentar as ações de planejamento e gestão do reservatório pelo poder público. Uma das ferramentas utilizadas em planejamento são os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), e as imagens geradas por sensores remotos podem ser utilizadas como uma importante fonte de dados para esta finalidade.

A avaliação da qualidade e o monitoramento das águas são fatores essenciais para a gestão adequada dos recursos hídricos [AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 201-], e neste estudo, a utilização de imagens de sensores remotos possibilitou o complemento dos dados de análises limnológicas.

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a qualidade das águas do compartimento ambiental Corpo Central I da represa Billings, e relacionar com a presença de vegetação aquática neste compartimento e com as características de uso e cobertura da terra na microbacia hidrográfica na qual a área de estudo está inserida.

Considerando a complexidade apresentada, o presente trabalho está dividido em dois capítulos: o capítulo I contém os resultados de análises da avaliação da qualidade das águas do Corpo Central I; no capítulo II, serão confrontados os dados obtidos de quantificação da presença da vegetação aquática nesta porção do reservatório nos períodos estudados, o uso e cobertura da terra nas microbacias e a avaliação da qualidade das águas obtidas no capítulo I para estabelecimento de suas possíveis inter-relações ou contribuições.

Este estudo faz parte de um projeto realizado pelo Laboratório de Ecofisiologia e Monitoramento Ambiental da UNIFESP - campus Diadema, que estuda de forma interdisciplinar a qualidade das águas do Corpo Central I da represa Billings, em

parceria com o Laboratório de Paleoecologia e Ecologia da Paisagem (UNIFESP/Diadema).

2 Área de estudo

2.1 Represa Billings

A represa Billings é um reservatório sub-tropical urbano, e foi construída em 1927 pela Companhia Light, com o objetivo de gerar energia elétrica na Usina Hidrelétrica de Henry Borden em Cubatão, aproveitando as águas da bacia do Alto Tietê e o desnível de mais de 700 metros da Serra do Mar (CAPOBIANCO & WHATELY, 2002).

Este reservatório está localizado na Região Metropolitana de São Paulo (Estado de São Paulo - Brasil), na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê, sendo o maior reservatório de água da região, e abrange seis municípios: São Bernardo do Campo, São Paulo, Santo André, Ribeirão Pires, Rio Grande da Serra e Diadema (Tabela 1) (CAPOBIANCO & WHATELY, 2002; TAGNIN & CARMO, 2001). A Lei Estadual Nº 13.579/2009 “define a Área de Proteção e Recuperação dos Mananciais da Bacia Hidrográfica do Reservatório Billings - APRM-B”, fracionando-a em compartimentos ambientais para fins de planejamento de uso e ocupação do solo (Artigo 9º), sendo eles: Corpo Central I, Corpo Central II, Taquacetuba-Bororé, Rio Grande e Rio Pequeno, e Capivari-Pedra Branca (SÃO PAULO, 2009).

Tabela 1 – Municípios que compõem a Área de Proteção e Recuperação dos Mananciais da Bacia Hidrográfica do Reservatório Billings (APRM-B): área, população, densidade demográfica e PIB.

Municípios	Área (km²)	População 2017	Densidade Demográfica 2017 (hab/km²)	PIB 2015 (mil reais)
São Paulo	1.521,11	12.106.920	7.959,27	650.544.789
São Bernardo do Campo	409,53	827.437	2.020,56	42.745.533
Santo André	175,78	715.231	4.068,85	26.240.885
Ribeirão Pires	99,08	121.848	1.229,86	2.813.436
Rio Grande da Serra	36,34	49.408	1.359,57	533.254
Diadema	30,73	417.869	13.586,58	13.854.570

Fonte: EMPLASA (2018).

Tagnin e Carmo (2001) apresentaram quatro usos conflitantes para as águas da represa Billings, sendo eles o abastecimento público, o controle de inundações, a geração de energia e a diluição de efluentes.

Ao longo dos últimos 40 anos ocorreu um processo acelerado de expansão urbana e ocupação irregular na sub-bacia hidrográfica do reservatório Billings (SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE, 2010). As águas da represa Billings apresentam baixa qualidade, resultante principalmente da poluição proveniente da intensa ocupação irregular de sua bacia hidrográfica e da reversão dos rios Pinheiros e Tietê (SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE, 2010).

Em 2000, a população total que morava na Bacia Billings era de aproximadamente 853 mil pessoas (WHATELY *et al.*, 2009). Essa ocupação da terra é caracterizada por loteamentos sem infraestrutura adequada, como o abastecimento de água e a coleta de esgotos (FRACALANZA & SINISGALLI, 2009). Segundo a Secretaria de Estado do Meio Ambiente (2010, p. 113), nas regiões de ocupações irregulares na Bacia Hidrográfica da Billings, a “maioria dos efluentes provenientes das residências (esgoto doméstico) é encaminhada aos corpos d’água sem nenhum tipo de tratamento”.

A reversão e bombeamento dos Rios Tietê e Pinheiros para a represa Billings, no Compartimento Ambiental Corpo Central I, foi realizada a partir do início da década de 40 para garantir a vazão de água necessária para a geração de energia elétrica, além de diminuir a gravidade das cheias dos rios Pinheiros e Tietê (TAGNIN & CARMO, 2001). Porém este processo gerou grandes consequências ambientais, comprometendo a qualidade da água da represa Billings, pois as águas dos rios Tietê e Pinheiros já eram impactadas devido à poluição por efluentes domésticos e industriais (CAPOBIANCO & WHATELY, 2002; FRACALANZA & SINISGALLI, 2009), como descrito por Capobianco & Whately (2002):

“O bombeamento das águas do Tietê para a Billings, no entanto, começou a mostrar suas graves consequências ambientais poucos anos depois. O crescimento da cidade de São Paulo e a falta de coleta e tratamento de esgotos levou à intensificação da poluição do Tietê e seus afluentes que, por sua vez, passaram a comprometer a qualidade da água da Billings. Nos primeiros anos da década de 70 a Cetesb - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - é obrigada a iniciar as operações de remoção da mancha anaeróbica presente na Represa. Em 1982, devido à grande quantidade de esgotos, que resultaram em sérios problemas

de contaminação por algas cianofíceas, algumas potencialmente tóxicas, surge a necessidade de interceptação total do Braço do Rio Grande, através da construção da Barragem Anchieta, para garantir o abastecimento de água do ABC, iniciado em 1958.” (CAPOBIANCO & WHATELY, p. 15)

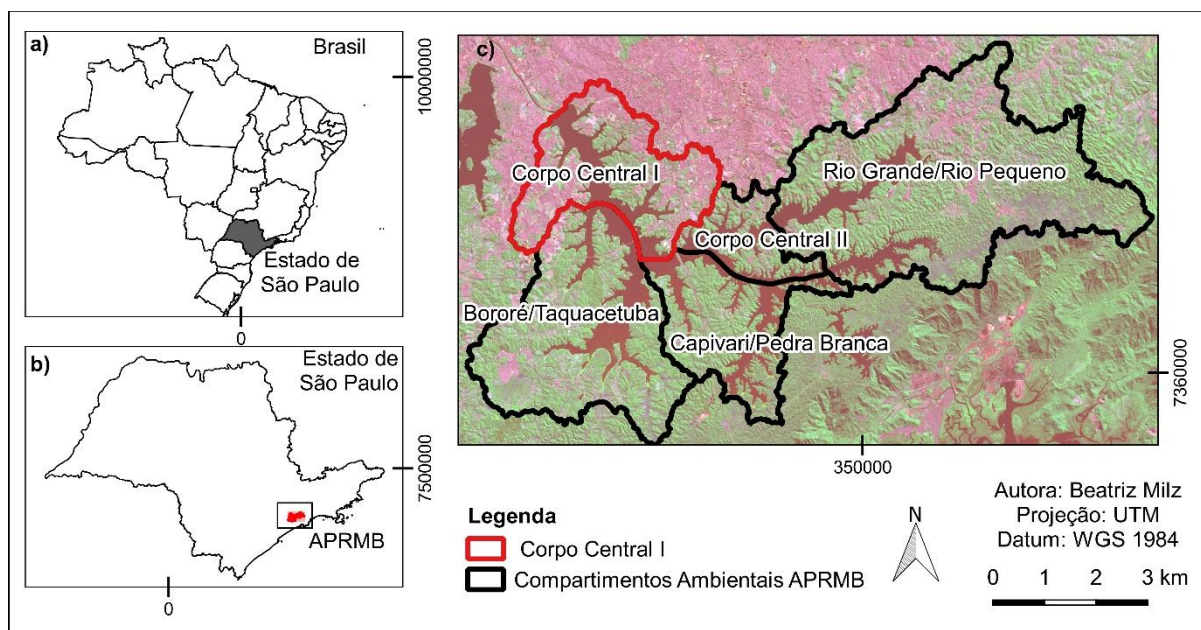
A Resolução Conjunta SMA-SES-03 de 1992 definiu que este bombeamento seria legalmente permitido apenas em situações específicas como em controle de cheias (CAPOBIANCO & WHATELY, 2002). Em 2010, a Resolução Conjunta SMA/SSE-002/2010 ampliou as possibilidades de realização deste bombeamento, incluindo também situações onde ocorra: “a formação de espumas surfactantes no Rio Tietê [...] que venham a extravasar o espelho d’água”, “queda da cota na tomada d’água da Usina Henry Borden a níveis insuficientes para assegurar o fornecimento de energia elétrica em situações emergenciais” e “formação de florescimento de algas nos corpos hídricos da Região Metropolitana de São Paulo e Médio Tietê, comprometendo sua qualidade para fins de abastecimento público” (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2010).

Considerando o conjunto de impactos que a represa Billings está submetida, causando um comprometimento da qualidade de suas águas, o monitoramento é de extrema importância por ser um reservatório estratégico para o abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo.

2.2 Compartimento Ambiental Corpo Central I

O Corpo Central I está localizado entre as coordenadas 23°41'7.70"S e 23°47'34.80"S de latitude sul, e 46°42'47.66"O e 46°33'38.46"O de longitude oeste e está inserido nos municípios de São Paulo, Diadema e São Bernardo do Campo (Figura 1). Segundo o Artigo 9º da Lei Estadual Nº 13.579/2009, o Corpo Central I é “constituído pelas áreas de drenagem das sub-bacias dos afluentes naturais contribuintes do Corpo Central do Reservatório, onde predomina ocupação urbana consolidada”. Esta lei também estabelece diretrizes para o planejamento e a gestão ambiental do compartimento (Artigo 10), podendo citar a implantação de ações de recuperação e saneamento ambiental, aprimoramento do sistema público de infraestrutura urbana, diminuição da carga de fósforo no reservatório e manutenção do índice de área vegetada observada no ano 2000 (SÃO PAULO, 2009).

Figura 1 – Localização da Área de Proteção e Recuperação de Mananciais da Bacia Hidrográfica do Reservatório Billings (APRM-B), e seus respectivos compartimentos ambientais.



Fonte: Elaborado pela autora utilizando o *Software QGIS*, e dados de MMA, 2007; DATAGEO, 2015; USGS, 2016.

A Tabela 2 apresenta os dados de saneamento básico, obtidos no relatório da CETESB (2017), no ano de 2016 para os municípios pertencentes à área de estudo, sendo eles: São Paulo, Diadema e São Bernardo do Campo. A concessão de abastecimento público e saneamento básico para estes municípios atualmente pertence a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP).

Tabela 2 – Dados de saneamento básico para os municípios pertencentes à área de estudo, em 2016.

Município	Concessão	População Urbana	Atendimento %		Corpo Receptor
			Coleta	Tratamento	
São Paulo	SABESP	11.910.639	88	75	Rios Tietê, Pinheiros e Tamanduateí
Diadema		415.180	90	30	Reservatório Billings
São Bernardo do Campo		808.500	90	32	Reservatório Billings e Ribeirão dos Meninos

Fonte: Elaborado pela autora, com dados de CETESB, 2017.

O Corpo Central I foi escolhido como objeto de estudo devido à: 1) importância do reservatório Billings para o abastecimento público da RMSP; 2) predominância de ocupação urbana consolidada e também irregular (SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE, 2010), o que se torna importante à avaliação da qualidade da água devido ao aporte de efluentes; 3) reversão ocasional das águas do rio Pinheiros, sendo uma importante fonte de poluição para o reservatório; 4) ampliação das pesquisas previamente realizadas pelo Laboratório de Monitoramento e Ecofisiologia Ambiental da UNIFESP no Compartimento Ambiental Corpo Central I.

3 Objetivos e Hipóteses

O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade das águas do Corpo Central I da represa Billings, relacionando com a presença de vegetação aquática e as características de uso e cobertura da terra na microbacia hidrográfica na qual este compartimento está inserido.

Os objetivos específicos dessa pesquisa foram:

- a) Avaliar a qualidade das águas do compartimento ambiental Corpo Central I da represa Billings;
- b) Avariar se os resultados limnológicos obtidos estão de acordo com os padrões estabelecidos pela Resolução nº 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA);
- c) Caracterizar o uso e cobertura da terra nas microbacias hidrográficas na qual o Corpo Central I está inserido;
- d) Quantificar a presença e mapear a distribuição espacial da vegetação aquática neste setor do reservatório no período estudado;
- e) Relacionar os dados obtidos de uso e cobertura da terra e a presença de vegetação aquática nas microbacias hidrográficas do Corpo Central I, com a avaliação da qualidade das águas.

Esta pesquisa teve como hipóteses:

- A variação sazonal implica em alterações significativas nas variáveis físicas, químicas e biológicas das águas superficiais do Corpo Central I;

- Ocorre uma mudança significativa nas variáveis físicas, químicas e biológicas das águas superficiais do Corpo Central I entre os pontos de coleta;
- A reversão do rio Pinheiros, através da Usina Elevatória de Pedreira, é o principal fator determinante na degradação da qualidade das águas superficiais do Corpo Central I.
- A quantidade de área ocupada pela vegetação aquática no Corpo Central I, no período estudado, apresenta variações sazonais.

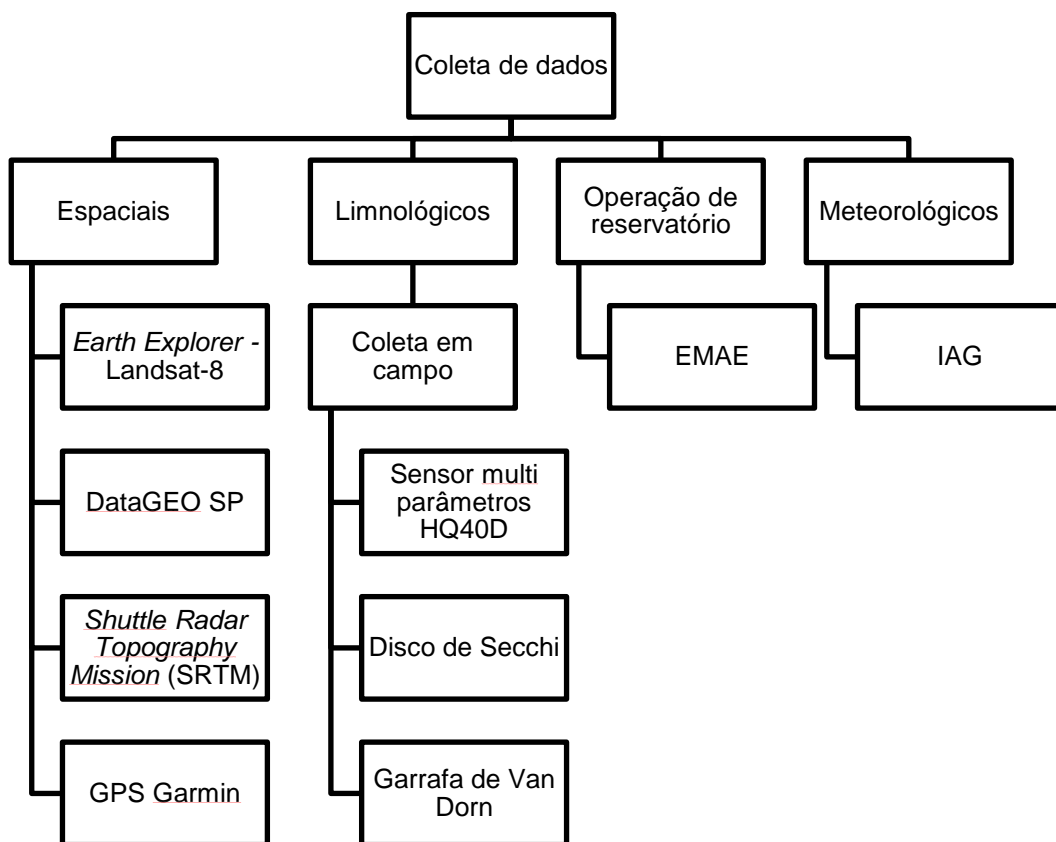
4 Metodologia geral

Foram realizadas quatro coletas de amostras de água em superfície (0,5 m) no período de estiagem (agosto de 2016 e 2017) e chuvoso (janeiro de 2017 e fevereiro de 2018). As técnicas de coleta, armazenagem, conservação e análise das amostras estão descritas em detalhes no Capítulo II.

Os mapas de uso e cobertura da terra foram elaborados utilizando dados governamentais e imagens do satélite LANDSAT-8 (USGS, 2016). O processamento e análise destes dados espaciais foi realizado utilizando *software* livre Quantum GIS (disponibilizado gratuitamente em: <https://www.qgis.org/>). As técnicas de geoprocessamento utilizadas para elaborar os mapas estão descritas em detalhes no Capítulo I.

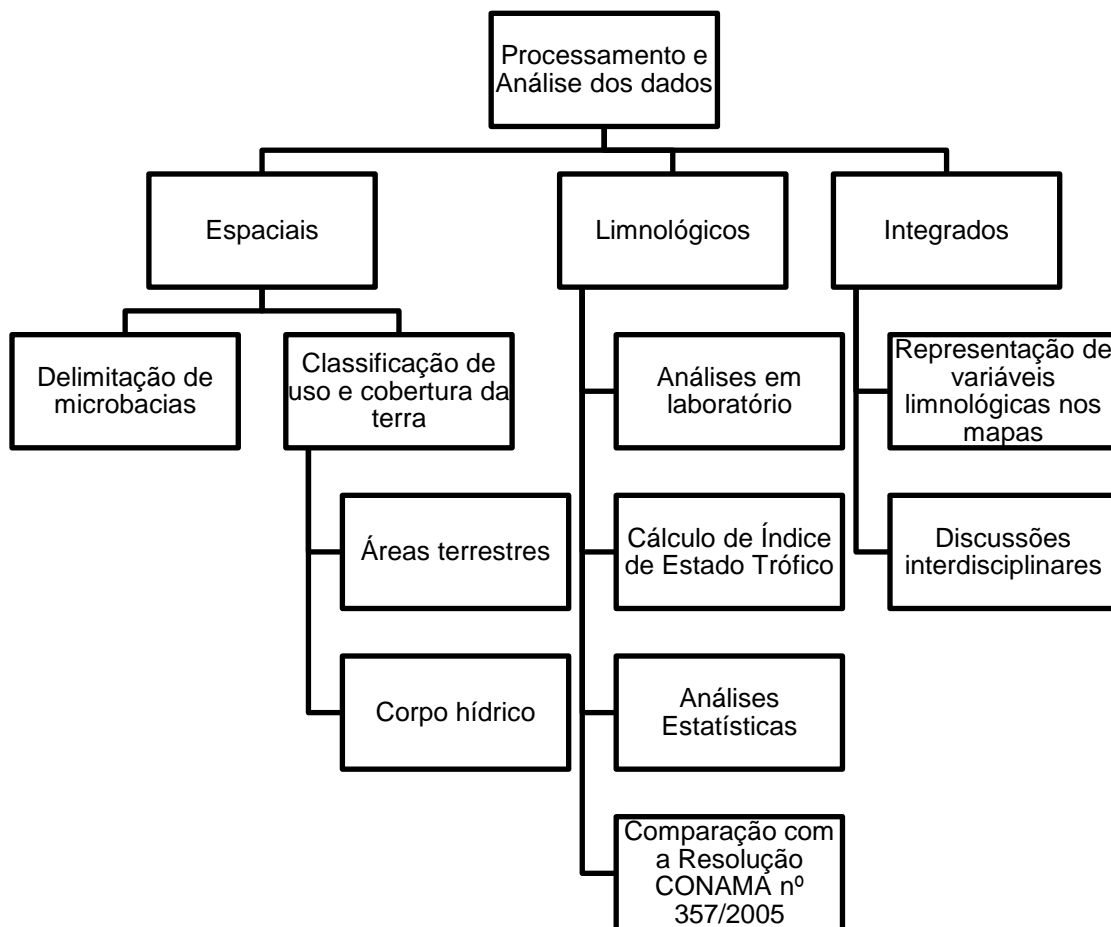
Na Figura 2 estão apresentadas brevemente as etapas de coleta de dados, e na Figura 3 estão apresentadas as etapas de processamento e análise dos dados.

Figura 2 – Fluxograma metodológico de coleta de dados.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 3 – Fluxograma metodológico de processamento e análise dos dados.



Fonte: Elaborado pela autora.

5 Capítulo I – Parâmetros de qualidade das águas superficiais do Corpo Central I da Represa Billings (São Paulo, SP)

Resumo:

A represa Billings é um reservatório importante para o abastecimento público da região metropolitana de São Paulo, que durante os anos 2013-2015 presenciou uma crise hídrica. Este capítulo teve como objetivo avaliar a qualidade das águas do compartimento ambiental Corpo Central I da represa Billings, e determinar se está em conformidade com os parâmetros descritos na Resolução CONAMA 357/2005. As coletas de água foram realizadas na superfície em quatro pontos, em um perfil longitudinal, contemplando dois períodos (estiagem e chuvoso) distribuídos em quatro coletas: estiagem ago/2016 e ago/2017; e chuvoso jan/2017 e fev/2018. As variáveis analisadas foram temperatura, oxigênio dissolvido, pH, condutividade elétrica, clorofila-a e nutrientes (fósforo e nitrogênio). A análise estatística dos resultados foi realizada utilizando uma análise de interação espaço-tempo, utilizada para avaliar se houve interação entre os pontos de coleta e períodos amostrados na variação dos parâmetros físicos, químicos e biológicos. Os parâmetros variaram significativamente segundo os períodos de coleta, porém não variaram significativamente entre os pontos de coleta. Nos períodos chuvosos, no ponto 1, localizado próximo à Usina Elevatória de Pedreira, observou-se concentrações superiores de nitrogênio total, fósforo total, e clorofila-a, destacando a reversão do rio Pinheiros como o principal fator para o aumento da eutrofização das águas superficiais do Corpo Central I. Os principais parâmetros com concentrações obtidas em não conformidade com a Resolução CONAMA 357/2005 para corpos hídricos de classe II foram o fósforo total, a clorofila-a e o oxigênio dissolvido. A aplicação do Índice de Estado Trófico evidenciou que as águas do Corpo Central I foram classificadas como Hipereutróficas, destacando a degradação da qualidade das águas neste compartimento.

Palavras-chave: Índice de Estado Trófico, Eutrofização, Abastecimento Público, Reservatório Urbano, Região Metropolitana de São Paulo.

5.1 Introdução

A urbanização acelerada aumenta as demandas para grandes volumes de água, intensificando também a pressão sobre os mananciais (TUNDISI, 2003). Neste contexto, podemos citar a construção de reservatórios para suprimento das diferentes demandas de água derivadas do aumento populacional. Muitos destes reservatórios estão localizadas em áreas urbanas, e são submetidos a inúmeras pressões, como por exemplo desmatamento do solo, poluição não controlada e padrões crescentes de consumo humano (TUNDISI, 2003; TUNDISI & TUNDISI, 2008).

A represa Billings é o maior reservatório localizado na RMSP, e suas águas apresentam qualidade comprometida em virtude do bombeamento dos rios Tietê e Pinheiros, além do lançamento de efluentes industriais e domésticos na represa “*in natura*” (CAPOBIANCO E WHATELY, 2002). O bombeamento dos rios Tietê e Pinheiros para a represa Billings através da Usina Elevatória de Pedreira atualmente é autorizado somente em algumas situações como o controle de cheias, coincidente com períodos de chuvas intensas que ocorrem no verão e elevam o nível das águas dos rios Pinheiros e Tietê (EMAE, 2011). A redução na qualidade de suas limita seus usos múltiplos, além de ter como consequência um rápido aumento da eutrofização (TUNDISI & TUNDISI, 2008).

A eutrofização é o enriquecimento por nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo nos ecossistemas aquáticos, e constitui-se em um problema global crescente (SØNDERGAARD, BJERRING, JEPPESEN, 2013; SINHA, MICHALAK, BALAJI, 2017). As consequências mais comuns resultantes do aumento da entrada de fontes de nitrogênio e fósforo em ecossistemas aquáticos são: diminuição do oxigênio dissolvido na água e da transparência na coluna d’água, crescimento de macrófitas, floração de algas e cianobactérias, morte de peixes, impactos na saúde humana (ex. contato com cianobactérias potencialmente produtoras de toxinas); entre outros (TUNDISI, 2003; SMITH, 2003; SCHINDLER, 2006).

Portanto, é importante que a qualidade dessas águas seja avaliada e monitorada, para garantir subsídios de ações de planejamento e gestão, visando a preservação dos ecossistemas aquáticos. Segundo a Agência Nacional das Águas (ANA) [201-], avaliação da qualidade e o monitoramento das águas são fatores essenciais para a gestão adequada dos recursos hídricos.

Com o intuito de classificar os recursos hídricos e regulamentar seus usos preponderantes com padrões de qualidade da água, foi estabelecida a Resolução nº 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). O enquadramento dos corpos hídricos proposto por esta resolução apresenta as classes como um “conjunto de condições e padrões de qualidade de água necessários ao atendimento dos usos preponderantes, atuais ou futuros” (CONAMA, 2009). Portanto, os padrões estabelecidos representam o nível de qualidade que essas águas devem possuir para atender os usos preponderantes e que devem ser considerados como metas a serem atingidas pelos gestores.

Baseado na Resolução CONAMA nº 357/2005 (Tabela 3), a represa Billings foi classificada pelo Governo do Estado de São Paulo através do Decreto Estadual nº 10.755/1977 como corpo hídrico de Classe II. Segundo a Resolução citada, suas águas podem ser destinadas ao abastecimento para consumo humano (após tratamento convencional), à proteção das comunidades aquáticas, à recreação de contato primário, à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto, aquicultura e à atividade de pesca (CONAMA, 2005).

Tabela 3 - Padrões de qualidade da água doce estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005.

Parâmetro	Unidade	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
Oxigênio Dissolvido	mg.L ⁻¹	> 6,0	> 5,0	> 4,0	> 2,0
pH	-	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0
Clorofila-a (Chl-a)	µg.L ⁻¹	< 10,0	< 30,0	< 60,0	-
Nitrato	mg.L ⁻¹	< 10,0	< 10,0	< 10,0	-
Nitrito	mg.L ⁻¹	< 1,0	< 1,0	< 1,0	-
Nitrogênio Amoniacal total	mg.L ⁻¹	< 3,7 para pH ≤ 7,5	< 3,7 para pH ≤ 7,5	< 13,3 para pH ≤ 7,5	-
		< 2,0 para 7,5 < pH ≤ 8,0	< 2,0 para 7,5 < pH ≤ 8,0	< 5,6 para 7,5 < pH ≤ 8,0	
		< 1,0 para 8,0 < pH ≤ 8,5	< 1,0 para 8,0 < pH ≤ 8,5	< 2,2 para 8,0 < pH ≤ 8,5	
		< 0,5 para pH > 8,5	< 0,5 para pH > 8,5	< 1,0 para pH > 8,5	
Fósforo total	mg.L ⁻¹	< 0,10	< 0,10	< 0,15	-

Fonte: Adaptado de CONAMA, 2005.

Considerando a importância da represa Billings para o abastecimento público, o objetivo deste capítulo foi avaliar a qualidade das águas do compartimento ambiental Corpo Central I desta represa, por meio de análise de parâmetros físicos, químicos e biológicos das águas superficiais deste reservatório. Os dados obtidos neste trabalho serão confrontados com os padrões estabelecidos para corpos hídricos de Classe II na Resolução CONAMA nº 357/2005, com intuito de verificar sua conformidade.

Estas informações serão importantes para subsidiar os gestores públicos na tentativa de minimizar os efeitos da degradação progressiva da qualidade da água deste reservatório, que é um importante recurso hídrico para o abastecimento público na Região Metropolitana de São Paulo.

As hipóteses levantadas neste trabalho são:

a) A variação sazonal (períodos de chuva e estiagem) implica em alterações significativas nas variáveis físicas, químicas e biológicas das águas superficiais do Corpo Central I;

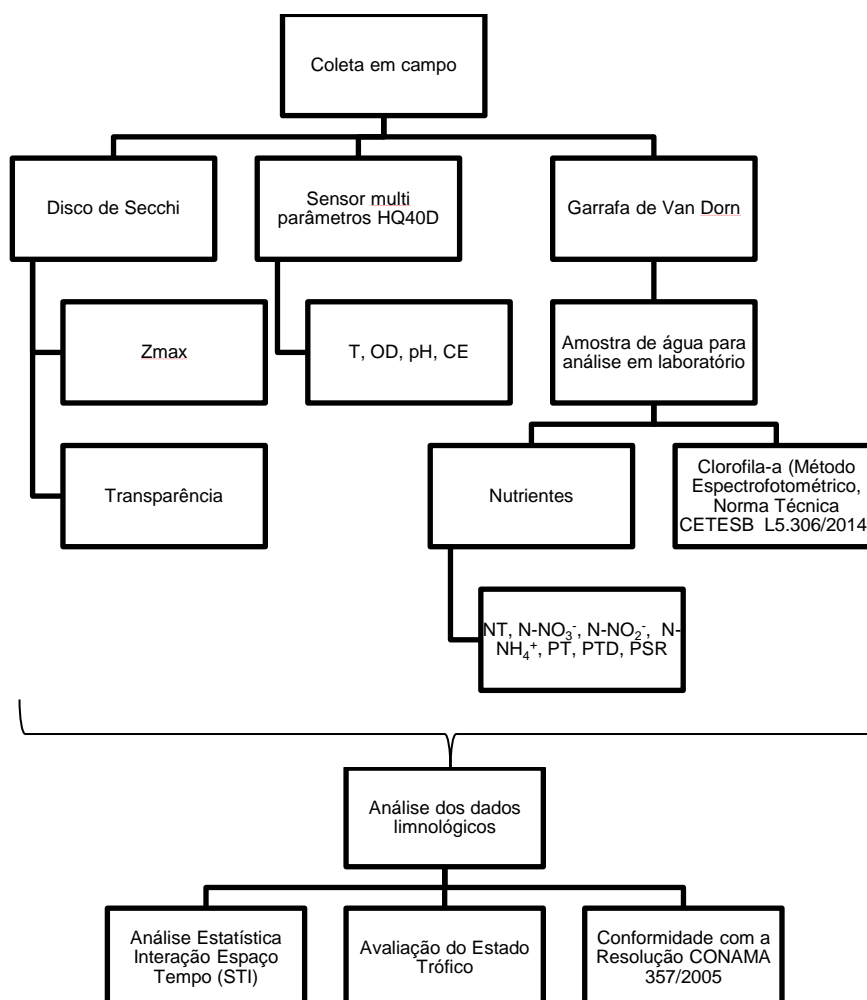
b) Ocorre uma diferença significativa nas variáveis físicas, químicas e biológicas das águas superficiais do Corpo Central I entre os pontos de coleta; e

c) A reversão do rio Pinheiros, através da Usina Elevatória de Pedreira, é o principal fator determinante na degradação da qualidade das águas superficiais do Corpo Central I.

5.2 Materiais e Métodos

A metodologia utilizada nesta pesquisa foi resumida em um esquema metodológico apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Esquema metodológico utilizado para coleta e análise de águas superficiais do Corpo Central I da represa Billings.



Fonte: Elaborado pela autora.

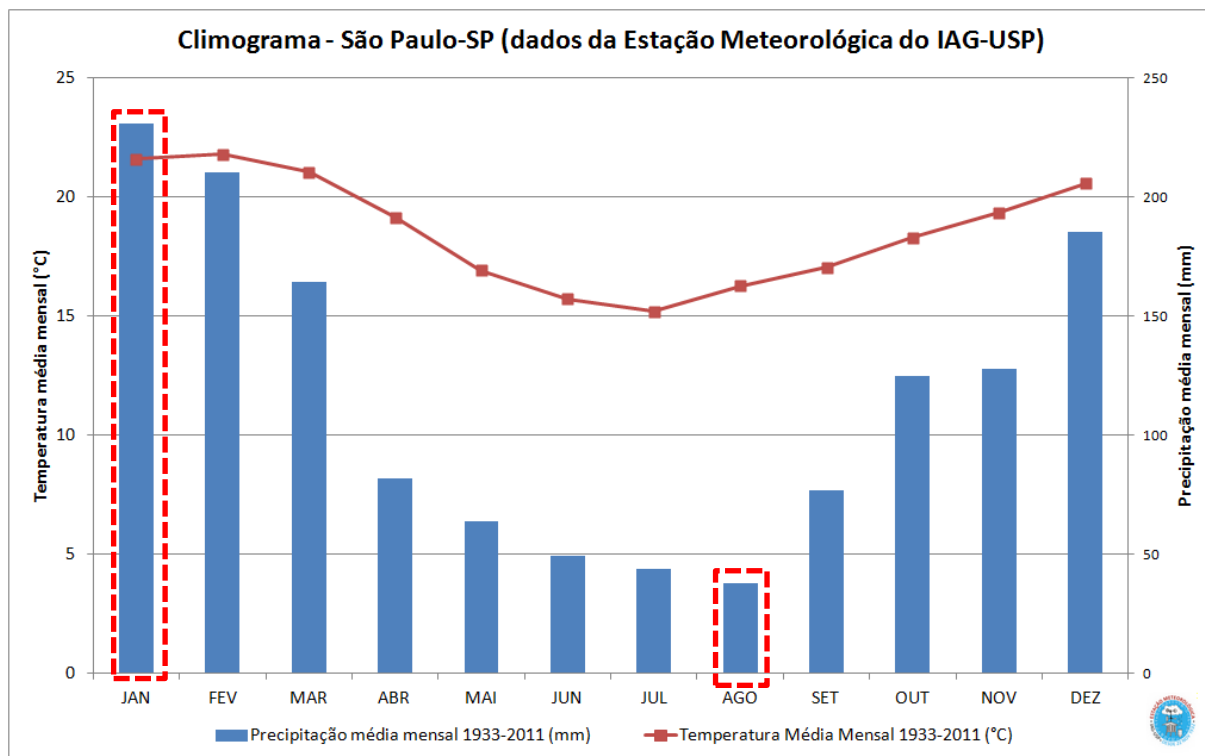
5.2.1 Coleta de dados

5.2.1.1 Dados meteorológicos

O clima de São Paulo é caracterizado por ter o inverno seco e o verão bastante chuvoso (IAG, [201-]). O Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP) possui uma Estação Meteorológica localizada na zona sul do município de São Paulo com dados coletados desde sua implantação em 1933. Na Figura 5, está indicada a precipitação média mensal e temperatura média mensal, baseada nos dados coletados na Estação Meteorológica do IAG/USP, entre 1933 e 2011 (IAG, [201-]). A partir destes dados, o mês escolhido

para coletar no período de estiagem foi o de agosto (menor precipitação média mensal) e o escolhido para coletar no período chuvoso foi janeiro (maior precipitação média mensal). Os dados de condições meteorológicas nos períodos de coleta utilizados neste trabalho foram cedidos pelo IAG/USP.

Figura 5 - Climograma de São Paulo - SP a partir de dados da Estação Meteorológica do IAG-USP.



Fonte: Adaptado de IAG-USP, [201-].

5.2.1.2 Amostragem Limnológica

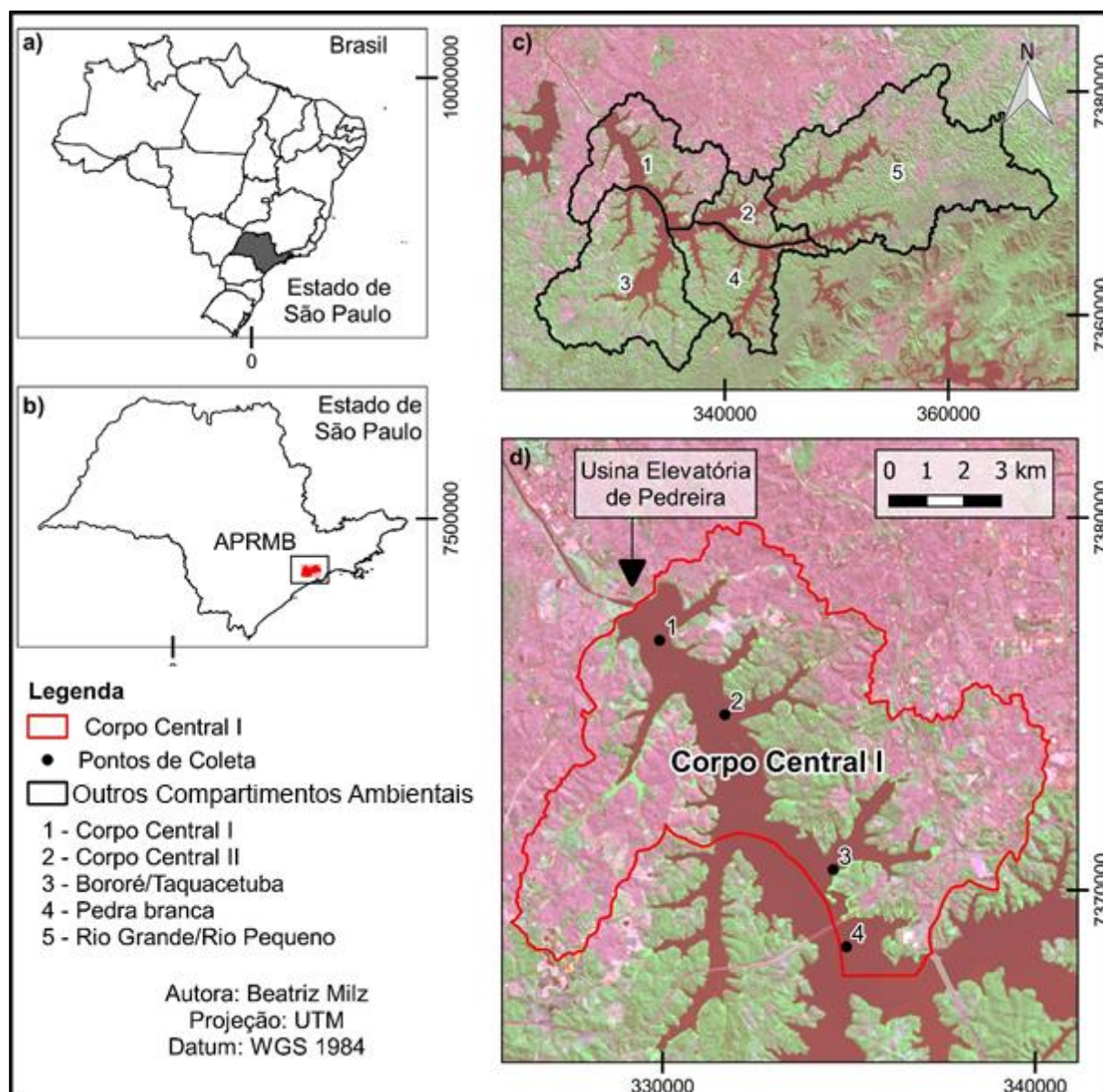
As coletas de amostras de água foram realizadas no período de estiagem (agosto de 2016 e 2017) e chuvoso (janeiro de 2017 e fevereiro de 2018). Foram selecionados 4 (quatro) pontos para realizar a coleta de amostras de água, localizados no compartimento ambiental Corpo Central I da represa Billings, em um perfil longitudinal (Figura 6 e Tabela 4).

Tabela 4 - Pontos de coleta de amostras de águas superficiais do Compartimento Ambiental Corpo Central I, o município onde o ponto está inserido, e característica principal.

Ponto	Município	Característica
1	São Paulo – SP	Local próximo à Usina Elevatória de Pedreira, onde ocorre a reversão do rio Pinheiros
2	Limite entre São Paulo e Diadema – SP	-
3	São Bernardo do Campo – SP	-
4	Limite entre São Paulo e São Bernardo do Campo – SP	Início do braço Taquacetuba, utilizado para transferir água para a Represa Guarapiranga

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 6 - Localização do: a) Estado de São Paulo; b) Área de Proteção e Recuperação de Mananciais da Bacia Hidrográfica do Reservatório Billings (APRM-B); c) Compartimentos ambientais da APRM-B; d) Compartimento ambiental Corpo Central I e pontos de coleta.



Fonte: Elaborado pela autora utilizando o *Software QGIS*, e dados de MMA, 2007; DATAGEO, 2015; USGS, 2016.

Ao iniciar cada coleta foi anotado o horário inicial, a condição climática, a coordenada geográfica obtida utilizando o aparelho GPS modelo “Etrex Vista H” da marca Garmin e outras observações necessárias. As amostras foram coletadas no período da manhã, na superfície do corpo d’água (0,5 m).

A profundidade máxima da coluna d’água (Z_{max}) foi medida utilizando um disco de Secchi (DS). Com este equipamento também foi determinado a transparência

da água, que foi obtida realizando a média entre os valores das profundidades de desaparecimento e reaparecimento do disco de Secchi na coluna d'água. A extensão da zona eufótica (Zeu) foi calculada multiplicando o valor de profundidade de desaparecimento do disco de Secchi pelo fator 3,0, sendo o fator mais frequentemente utilizado por limnólogos brasileiros (ESTEVES, 2011).

A temperatura, o pH, a concentração de oxigênio dissolvido e a condutividade elétrica foram medidos *in situ*, para o perfil da coluna d'água, por meio de sensores, marca HACH modelo HQ40D, que foi calibrado no dia antecedente a coleta.

Foi coletado amostras de água, com o auxílio da garrafa de Van Dorn para que em laboratório fosse realizado as análises quantitativas de nutrientes (série de fósforo e nitrogênio) e clorofila-a. Para preservar as amostras durante a coleta e o transporte até o laboratório, principalmente do contato da luz direta e aumento de temperatura, as amostras foram armazenadas em galões de polietileno (5 litros) e acondicionadas em bolsas térmicas com gelo.

5.2.1.3 Dados de operação do reservatório fornecidos pela Empresa Metropolitana de Águas e Energia (EMAE)

A Empresa Metropolitana de Águas e Energia (EMAE) é responsável pela operação da Usina Elevatória de Pedreira e é a operadora das águas da represa Billings. A Usina Elevatória de Pedreira (Figura 7) foi inaugurada em 1939, e sua capacidade atual de bombeamento é de 385 m³/s (EMAE, 2011).

Figura 7 – Usina Elevatória de Pedreira, localizada no município de São Paulo - SP.



Fonte: EMAE, 2011.

Foi solicitado à EMAE os seguintes dados referentes à operação do reservatório: volume de água bombeado para a represa Billings na usina Elevatória de Pedreira, tempo de retenção de água da represa Billings; cota da represa Billings e direção preferencial do fluxo de água no Corpo central I. Os dados fornecidos pela EMAE, referentes à carta numerada como CT/G/4989/2018, foram os seguintes:

- O volume d'água bombeado na Usina Elevatória de Pedreira para o Reservatório Billings no período de julho/2016 à agosto/2017 correspondeu a $205,728 \times 10^6 \text{ m}^3$;
- O tempo médio de retenção de água no Reservatório Billings (Compartimento Pedreira) em 2016 e 2017 (até novembro) foi de aproximadamente 768 e 970 dias, respectivamente;
- A direção preferencial das águas do corpo principal do Reservatório Billings (Compartimento Pedreira) é no sentido à Barragem Reguladora Billings Pedras, de onde são descarregadas para o reservatório Rio das Pedras e posteriormente turbinadas na Usina Hidrelétrica Henry Borden, no município de Cubatão;
- Os níveis d'água diários do Reservatório Billings (Compartimento Pedreira), de julho/2016 a agosto/2017 foram em média de 745,21 metros (desvio padrão = 0,29; $n = 427$).

A Figura 8 apresenta a vazão bombeada diária pela Usina Elevatória de Pedreira para o reservatório Billings no ano de 2016 (CETESB, 2017).

Figura 8 – Vazão Bombeada pela Usina Elevatória de Pedreira para o reservatório Billings, no ano de 2016.



Fonte: CETESB (2017).

5.2.2 Análise dos dados e amostras coletadas

5.2.2.1 Análises de Nutrientes

Ao chegar no laboratório, parte da amostra bruta foi congelada para posterior análise dos nutrientes totais (fósforo e nitrogênio).

As concentrações de nitrogênio total (NT), nitrato (N-NO_3^-), nitrito (N-NO_2^-), nitrogênio amoniacal (N-NH_4^+), fósforo total dissolvido (PTD) e fósforo total (PT) e ortofosfato dissolvido (PSR), foram determinados a partir do método Espectrofotométrico, utilizando o equipamento *Biochrom Libra S60*, baseado nas metodologias descritas e cujas referências estão apresentadas na Tabela 5. Todos os ensaios foram feitos em duplicatas.

Tabela 5 - Nutrientes determinados com seus respectivos limites de detecção (L.D.) e quantificação (L.Q.) calculados em laboratório, unidade e referência.

Variável Analisada	L.D.	L.Q.	Unidade	Referência
Nitrogênio Total (NT)	30,0	102,0	$\mu\text{g.L}^{-1}$	Valderrama (1981)
Nitrato (N-NO_3^-)	17,0	55,5	$\mu\text{g.L}^{-1}$	Mackereth <i>et al.</i> (1978)
Nitrito (N-NO_2^-)	2,0	6,0	$\mu\text{g.L}^{-1}$	Mackereth <i>et al.</i> (1978)
Nitrogênio amoniacal (N-NH_4^+)	10,0	33,5	$\mu\text{g.L}^{-1}$	Koroleff (1976)
Fósforo total (PT)	3,0	9,0	$\mu\text{g.L}^{-1}$	Valderrama (1981)
Fósforo total dissolvido (PTD)	3,0	9,0	$\mu\text{g.L}^{-1}$	Strickland e Parsons (1960)
Ortofosfato (PSR)	2,0	6,0	$\mu\text{g.L}^{-1}$	Strickland e Parsons (1960)

5.2.2.2 Clorofila-a

A determinação da concentração Clorofila-a foi realizada a partir do método espectrofotométrico, descrito na Norma Técnica L5.306/2014 da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), utilizando a extração com acetona 90%, por meio das leituras nas densidades ópticas obtidas nos comprimentos de onda 665 e 750 nm, fornecendo resultados em “termos de peso dos referidos pigmentos por unidade de volume ($\mu\text{g.L}^{-1}$)” (CETESB, 2014).

5.2.2.3 Índice de Estado Trófico

Para classificar as amostras de água em cada ponto de amostragem e período segundo seu grau de trofia, foi calculado o Índice de Estado Trófico para reservatórios tropicais/subtropicais (TSI-tsr) (Tabela 6) (CUNHA *et al.*, 2013b). Para isso, foram utilizados os dados obtidos nas análises das concentrações de clorofila-a e de fósforo total na superfície, e foram utilizadas as seguintes equações (CUNHA *et al.*, 2013b):

$$\text{TSI(Chla)}_{\text{tsr}} = 10 \times (6 - (-0,2512 \times (\ln \text{Chla}) + 0,842257 / \ln 2)) \quad (1)$$

$$\text{TSI(TP)}_{\text{tsr}} = 10 \times (6 - (-0,27637 \times (\ln \text{TP}) + 1,329766 / \ln 2)) \quad (2)$$

$$\text{TSI-tsr} = (\text{TSI(TP)}_{\text{tsr}} + \text{TSI(Chla)}_{\text{tsr}}) / 2 \quad (3)$$

Em que:

TP: concentração de fósforo total medida à superfície da água, em $\mu\text{g.L}^{-1}$;

Chla: concentração de clorofila-a medida à superfície da água, em $\mu\text{g.L}^{-1}$;

ln: logaritmo natural.

Tabela 6 - Classificação do Índice de Estado Trófico para reservatórios tropicais/subtropicais (TSI-tsr):

Categoria (Estado Trófico)	Ponderação
Ultraoligotrófico	$\text{TSI}_{\text{tsr}} \leq 51,1$
Oligotrófico	$51,2 < \text{TSI}_{\text{tsr}} \leq 53,1$
Mesotrófico	$53,2 < \text{TSI}_{\text{tsr}} \leq 55,7$
Eutrófico	$55,8 < \text{TSI}_{\text{tsr}} \leq 58,1$
Supereutrófico	$58,2 < \text{TSI}_{\text{tsr}} \leq 59,0$
Hipereutrófico	$\text{TSI}_{\text{tsr}} > 59,1$

Fonte: Adaptado de CUNHA *et al.*, 2013b.

5.2.2.4 Análise Estatística

5.2.2.4.1 Matriz de Correlação

A matriz de correlação foi realizada utilizando os parâmetros analisados, considerando um nível de significância de 0,05. Essa análise estatística foi realizada no Software Graph Pad Prism Versão 6.01 (2012) para Windows.

5.2.2.4.2 Análise de Interação Espaço-tempo

A análise de interação espaço-tempo (*Space-time interaction* - STI; Legendre *et al.*, 2010) foi utilizada para avaliar se houve interação entre os pontos de coleta

(espaço) e períodos (tempo) amostrados na variação dos parâmetros físicos, químicos e biológicos. Essa análise é necessária porque a amostragem em cada período foi realizada em quatro pontos de coleta, nesse caso, testar a interação entre os períodos e pontos de coleta por uma análise de variância (ANOVA) tradicional não é possível pela ausência de réplicas para estimar a soma dos quadrados dos resíduos (Legendre *et al.*, 2010).

Na STI foi utilizado um modelo de ANOVA fatorial com a interação subajustada (modelo 5 em Legendre *et al.*, 2010). Segundo os autores, esse modelo permite o teste da interação na ausência de replicação, apresenta taxas de erro tipo I corretas e possibilita o uso de variáveis respostas uni ou multivariadas.

Para explorar quais parâmetros variaram em função dos pontos de coleta e períodos amostrados, STI univariadas foram realizadas com as variáveis respostas transformadas por $\log_{10}(x+1)$ para melhorar a normalidade dos resíduos. A significância na STI foi avaliada utilizando 999 permutações. Foi adotado nível de significância de 5% e todas as análises foram realizadas no programa R (R Core Team, 2015) com os pacotes 'STI' (Legendre *et al.*, 2012) e 'vegan' (Oksanen *et al.*, 2017).

5.3 Resultados

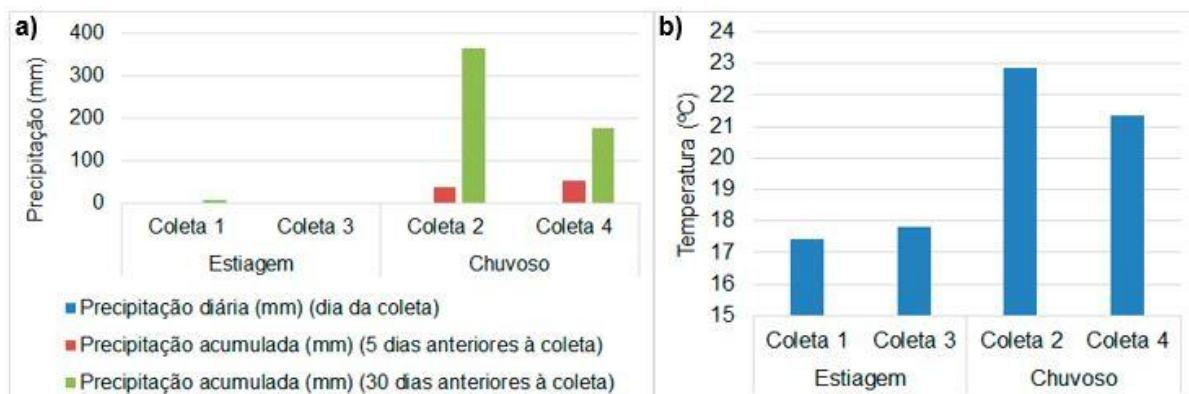
5.3.1 Precipitação e Temperatura do ar

A Figura 9 apresenta os dados de precipitação diária na data da coleta e precipitação acumulada em 5 e 30 dias anteriores às coletas, e os dados de temperatura média (°C) do ar nas datas de coleta, referentes à Estação Meteorológica do IAG/USP.

Nos períodos de estiagem não ocorreu precipitação no dia da coleta e nos 5 dias anteriores também, e considerando 30 dias anteriores, houve precipitação próxima à zero. Em contrapartida, para os períodos chuvosos, ocorreu precipitação nos 5 e 30 dias anteriores à coleta, justificando a escolha das coletas realizadas como representativas das estações seca e chuvosa. A coleta 2 (período chuvoso/2017) apresentou o maior índice pluviométrico em relação aos demais períodos, coincidente com a maior precipitação acumulada nos 30 dias anteriores à coleta. Comparando-se

os períodos, as temperaturas médias diárias nas datas de coleta foram superiores nos períodos chuvosos.

Figura 9 – a) Distribuição da precipitação diária na data da coleta, e precipitação acumulada em 5 e 30 dias anteriores à coleta, e b) Distribuição da temperatura média na data das coletas, na Estação Meteorológica do IAG-USP (São Paulo, SP).

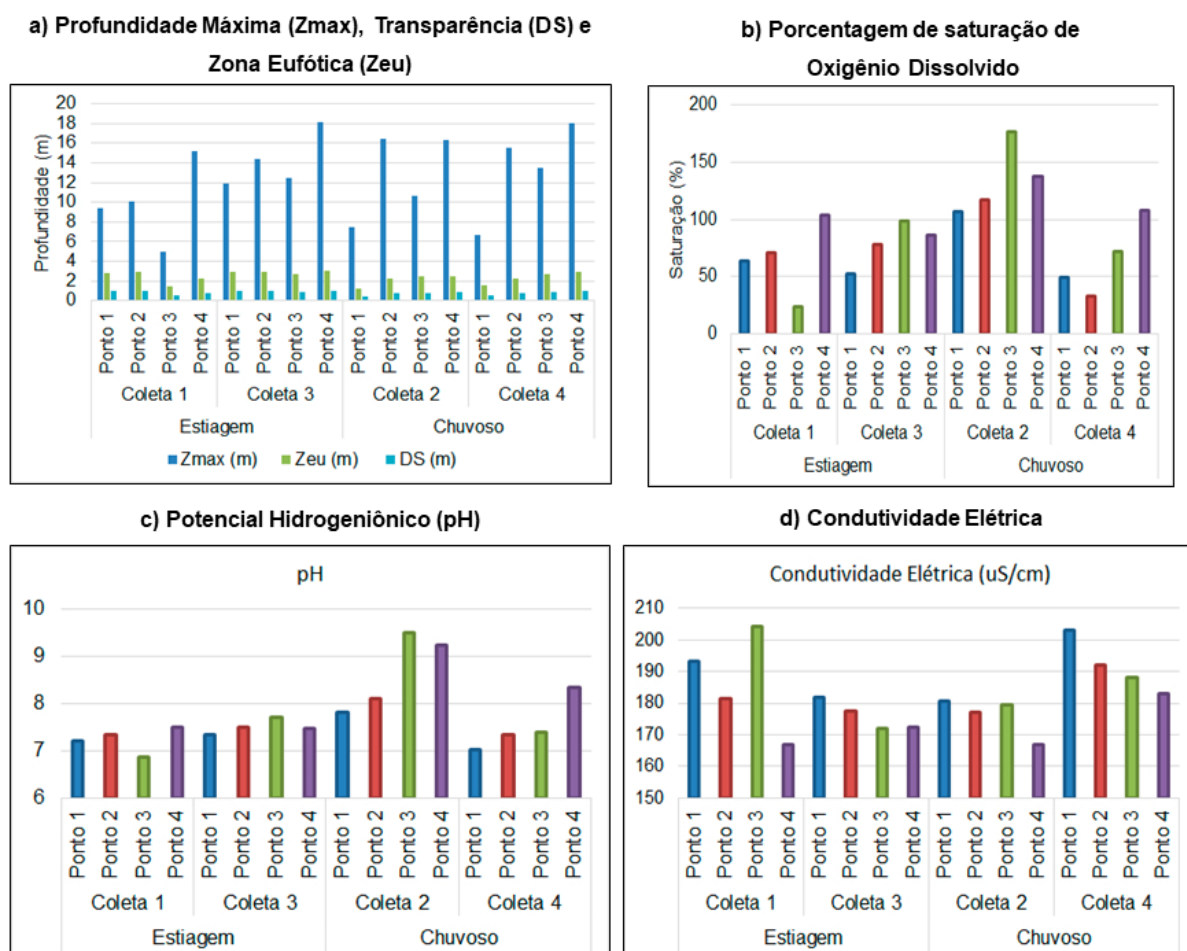


Fonte: Elaborado pela autora. Dados da Estação Meteorológica do IAG/USP.

5.3.2 Dados coletados in situ

A Figura 10 apresenta os dados obtidos para a profundidade da coluna d'água (Zmax), transparência (DS), zona eufótica (Zeu). Também estão representados dados para a superfície da coluna de água obtidos in situ: saturação de oxigênio dissolvido, potencial hidrogeniônico e condutividade elétrica. Na Figura 11 estão representados os perfis de temperatura da coluna d'água e de oxigênio dissolvido obtidos nas coletas.

Figura 10 – Gráficos de: a) Profundidade máxima (Zmax), profundidade da zona eufótica (Zeu) e profundidade do disco de Secchi (DS), e dados de superfície de: b) Saturação (%) de Oxigênio Dissolvido; c) Potencial Hidrogeniônico (pH); d) Condutividade Elétrica, no Corpo Central I da represa Billings.



Fonte: Elaborado pela autora.

Comparativamente, o período chuvoso de 2017 (coleta 2) apresentou temperaturas superiores da água quando comparado ao período chuvoso de 2018 (coleta 4). Em relação ao perfil vertical de temperatura, houve uma diminuição dos valores de temperatura com o aumento da profundidade em todos os pontos e períodos.

Na coleta 1 (período de estiagem/2016), apesar de ocorrer um declínio de OD com o aumento de profundidade, essa diminuição não foi brusca, sendo que apenas no ponto 3 a condição no fundo foi de anoxia. Para a coleta 3 (período de estiagem/2017), a condição de anoxia no fundo da coluna d'água foi apresentada para os pontos 1 e 2. Na coleta 2 (período chuvoso/2017), as concentrações de oxigênio

dissolvido foram maiores na superfície da água, havendo uma diminuição da concentração com o aumento da profundidade, atingindo valores próximos a 0 mg.L^{-1} , caracterizando um ambiente anóxico no próximo ao sedimento, em todos os pontos. Na coleta 4 (período chuvoso/2018), a condição de anoxia em maiores profundidades da coluna d'água foi encontrada somente para o ponto 2.

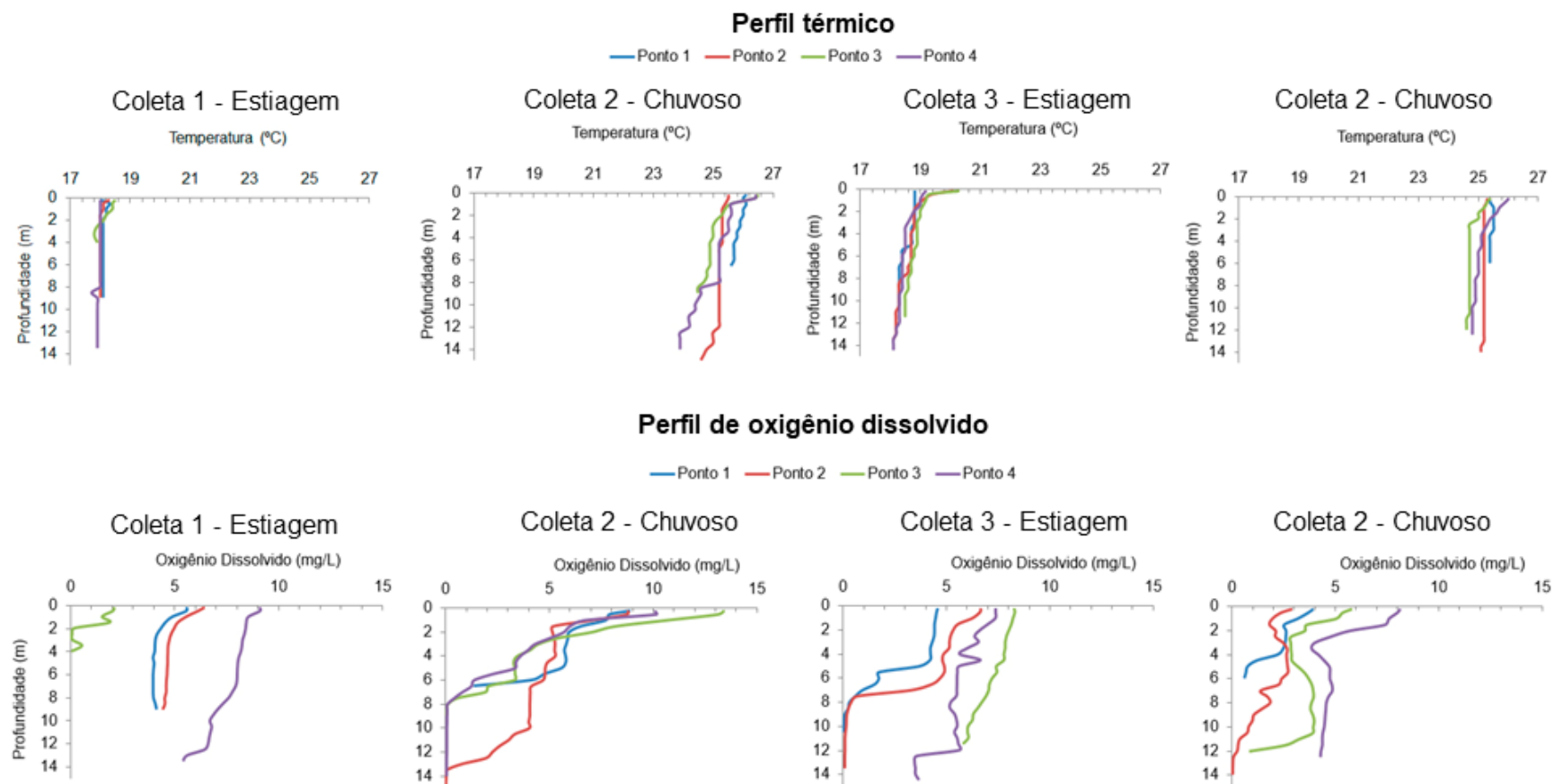
Para os períodos chuvosos, os valores de pH tenderam a aumentar através do perfil longitudinal, porém este fato não ocorreu nas coletas em período de estiagem.

Na Figura 12 estão representadas os resultados da aplicação do Índice de Estado Trófico para reservatórios tropicais/subtropicais (TSI-tsr) e as concentrações médias de clorofila-a e dos nutrientes nitrogênio total (NT), nitrato (N-NO_3), nitrito (N-NO_2^-) e nitrogênio amoniacal (N-NH_4^+), fósforo total (PT), fósforo total dissolvido (PTD) e ortofosfato (PSR) obtidos na superfície dos pontos amostrados. A aplicação do TSI-tsr (Cunha *et al.*, 2013b) apresentou que todos os pontos amostrados foram classificados como hipereutrófico, exceto pelo ponto 4 na coleta 2, que foi classificado como supereutrófico.

As concentrações dos seguintes nutrientes ficaram abaixo dos limites de detecção ou quantificação: N-NO_2^- para o Coleta 1 - Ponto 4 ficaram abaixo do limite de quantificação (LQ); N-NH_4^+ para a Coleta 2 - Ponto 4 ficaram abaixo do limite de quantificação (LQ), e para Coleta 4 – Ponto 4 ficou abaixo do limite de detecção (LD); PSR ficaram abaixo do limite de detecção para o ponto 4 na coleta 2, e de quantificação para os pontos 1 e 2 na coleta 2, e ponto 4 na coleta 4.

Na Tabela 7 estão apresentados as médias para os períodos de estiagem e chuvoso e os menores e maiores valores obtidos para os parâmetros analisados.

Figura 11 - Perfil de Temperatura e Oxigênio Dissolvido nos pontos amostrados no Corpo Central I da represa Billings, em quatro coletas (2016-2018).



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 12 - Concentrações médias dos nutrientes: nitrogênio total (NT), nitrato (N-NO_3^-), nitrito (N-NO_2^-), nitrogênio amoniacal (N-NH_4^+), fósforo total (PT), fósforo total dissolvido (PTD) e ortofosfato (PSR), e de clorofila-a e índice de Estado Trófico para reservatórios tropicais/subtropicais (TSI-tsr), na superfície d'água dos pontos amostrados na represa Billings, em quatro coletas.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 7 – Parâmetros analisados, unidade de medida, menor e maior valor encontrado e médias para os períodos de estiagem e chuvoso (valores acima de LD e LQ).

	Parâmetro	Unidade	Menor valor	Maior valor	Média estiagem	Média chuvoso
Profundidade	Profundidade da coluna d'água (Zmax)	m	4,95	18,1	12,1	13,1
	Transparência (DS)	m	0,4	1,0	0,9	0,7
	Zona Eufótica (Zeu)	m	1,3	3,1	2,6	2,2
Superfície	Temperatura (T)	° C	18,0	26,4	18,7	25,8
	Oxigênio Dissolvido (OD)	µg.L ⁻¹	2,0	13,1	6,2	7,4
	Saturação de Oxigênio Dissolvido	%	23,5	177	72	100
	Potencial Hidrogeniônico (pH)	-	6,9	9,5	7,4	8,1
	Condutividade Elétrica (CE)	µS/cm	167,0	204,0	181,1	183,7
	Nitrogênio Total (NT)	µg.L ⁻¹	695,9	4.744,5	2.704,3	2.154,8
	Nitrato (N-NO ₃ ⁻)	µg.L ⁻¹	112,1	823,9	670,9	254,9
	Nitrito (N-NO ₂ ⁻)	µg.L ⁻¹	7,4	435,0	41,75	104,1
	Nitrogênio amoniacal (N-NH ₄ ⁺)	µg.L ⁻¹	51,0	1.543,2	577,6	263,45
	Fósforo total (PT)	µg.L ⁻¹	76,0	411,5	193,1	170,5
	Fósforo total dissolvido (PTD)	µg.L ⁻¹	12,4	276,9	87,3	40,1
	Ortofosfato (PSR)	µg.L ⁻¹	6,8	49,7	20,5	16,2
	Clorofila-a	µg.L ⁻¹	15,6	158,3	38,6	70,7

Fonte: Elaborado pela autora.

5.3.3 Análises Estatísticas

5.3.3.1 Matriz de correlação

Os resultados obtidos na matriz de correlação estão representados na Tabela 8. Foram obtidas entre os parâmetros 13 relações positivas significativas (destacando a relação entre a precipitação nos 30 dias anteriores à coleta e a temperatura da superfície da água); e 10 relações negativas significativas.

Tabela 8 – Matriz de correlação dos parâmetros. Valores em negrito foram significativos. NT: Nitrogênio Total; NO2: Nitrito; NO3: Nitrato; NH4: Nitrogênio Amoniacal; PT: Fósforo Total; PTD: Fósforo Total Dissolvido; CHLA: Clorofila-a; DS: Profundidade do Disco de Secchi; T_agua: Temperatura da superfície da água; OD: Oxigênio Dissolvido; pH: Potencial Hidrogeniônico; CE: Condutividade Elétrica; PREC_30D: Precipitação nos 30 dias anteriores à coleta.

	NT	NO2	NO3	NH4	PT	PTD	CHLA	DS	T_agua	OD	pH	CE	PREC_30D
NT		-0.070	-0.088	0.466	0.728	0.324	-0.154	-0.553	-0.278	0.094	-0.111	-0.057	0.059
NO2	-0.070		-0.132	-0.209	0.359	0.138	0.859	-0.576	0.253	-0.434	-0.337	0.634	0.099
NO3	-0.088	-0.132		-0.007	-0.057	0.149	-0.189	0.494	-0.789	-0.301	-0.597	-0.064	-0.853
NH4	0.466	-0.209	-0.007		0.647	0.851	-0.199	-0.245	-0.360	-0.317	-0.213	0.420	-0.211
PT	0.728	0.359	-0.057	0.647		0.706	0.378	-0.764	-0.151	-0.433	-0.439	0.574	-0.027
PTD	0.324	0.138	0.149	0.851	0.706		0.177	-0.350	-0.410	-0.621	-0.470	0.660	-0.375
CHLA	-0.154	0.859	-0.189	-0.199	0.378	0.177		-0.467	0.392	-0.507	-0.316	0.748	0.192
DS	-0.553	-0.576	0.494	-0.245	-0.764	-0.350	-0.467		-0.305	0.203	0.128	-0.433	-0.382
T_agua	-0.278	0.253	-0.789	-0.360	-0.151	-0.410	0.392	-0.305		0.285	0.584	0.056	0.913
OD	0.094	-0.434	-0.301	-0.317	-0.433	-0.621	-0.507	0.203	0.285		0.849	-0.757	0.478
pH	-0.111	-0.337	-0.597	-0.213	-0.439	-0.470	-0.316	0.128	0.584	0.849		-0.538	0.707
CE	-0.057	0.634	-0.064	0.420	0.574	0.660	0.748	-0.433	0.056	-0.757	-0.538		-0.111
PREC_30D	0.059	0.099	-0.853	-0.211	-0.027	-0.375	0.192	-0.382	0.913	0.478	0.707	-0.111	

Fonte: Software Graph Pad Prism Versão 6.01 (2012).

5.3.3.2 Análise Estatística de Interação Espaço-Tempo

A Tabela 9 apresenta o resultado da aplicação da Análise Interação Espaço Tempo univariada. A interação entre ponto e período de coleta não foi significativa para nenhum dos parâmetros físicos, químicos e biológicos modelados, portanto não foram apresentados nesta tabela. As análises univariada referentes ao espaço, ou seja, considerando os pontos de coleta, apontou diferenças significativas para os nutrientes nitrito ($R^2_{\text{ajustado}} = 0,36$) e nitrogênio amoniacal ($R^2_{\text{ajustado}} = 0,38$). As análises univariadas referentes ao período de coleta e os parâmetros físicos, químicos e biológicos apresentaram diferenças significativas para pH, nitrogênio total, nitrato, ortofosfato, clorofila a e temperatura. A proporção de variabilidade explicada pelos períodos de coletas, para as variáveis nas quais o período foi significativo, variou de 37% (clorofila-a) a 99% (temperatura; Tabela 9).

Tabela 9 - Efeito dos pontos e meses de coleta na variação dos parâmetros físicos, químicos e biológicos. S: pontos de coleta; T: período de coleta. Valores de F em negrito foram significativos.

Parâmetro resposta	Fator	F	p	R ² _{ajustado}
pH	S	1,60	0,22	0,00
	T	5,54	0,04	0,50
Nitrogênio total	S	1,06	0,51	0,00
	T	8,17	0,04	0,66
Nitrito	S	6,08	0,04	0,36
	T	1,52	0,35	0,00
Nitrato	S	0,12	0,98	0,00
	T	8,32	0,03	0,76
N-amoniacal	S	4,16	0,03	0,38
	T	2,42	0,27	0,11
Fósforo total	S	2,84	0,14	0,30
	T	0,95	0,44	0,00
Fósforo total dissolvido	S	2,25	0,18	0,21
	T	0,91	0,50	0,00
Ortofosfato	S	3,43	0,09	0,00
	T	11,71	0,01	0,45
Clorofila-a	S	5,37	0,07	0,11
	T	9,28	0,02	0,37
Disco de Secchi	S	0,64	0,64	0,00
	T	1,01	0,53	0,06
Temperatura	S	0,48	0,68	0,00
	T	492,10	0,00	0,99
Oxigênio dissolvido	S	1,52	0,38	0,00
	T	3,54	0,11	0,25
Condutividade Elétrica	S	3,85	0,13	0,21
	T	4,06	0,08	0,23

Fonte: Metodologia proposta por Legendre *et al.* (2010), o *software* R (R CORE TEAM, 2015), e pacotes 'STI' (Legendre *et al.*, 2012) e 'vegan' (Oksanen *et al.*, 2017).

5.3.4 Conformidade com a Resolução CONAMA nº 357/2005

Na Tabela 10 estão representados os dados obtidos neste trabalho, e comparados com os padrões estabelecidos para corpos hídricos de Classe II pela Resolução CONAMA nº 357/2005, representados em verde os resultados em conformidade, e em vermelho representam resultados em não conformidade com os padrões estabelecidos pela resolução.

Tabela 10 - Comparação dos resultados obtidos no Corpo Central I da represa Billings e a conformidade (verde) e não-conformidade (vermelho) com os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/2005 para corpos hídricos de Classe II.

	Coleta 1	Coleta 2	Coleta 3	Coleta 4
	Estiagem/2016	Chuvoso/2017	Estiagem/2017	Chuvoso/2018
Ponto	Oxigênio Dissolvido (OD) (mg.L⁻¹)			
1	5,56	7,9	4,51	3,7
2	6,12	8,74	6,63	2,37
3	2,03	13,12	8,3	5,36
4	9,09	10,17	7,37	8,01
Ponto	pH			
1	7,21	7,88	7,36	7,02
2	7,33	8,18	7,6	7,35
3	6,87	9,49	7,78	7,39
4	7,5	9,27	7,56	8,33
Ponto	Clorofila-a (Chl-a) (µg.L⁻¹)			
1	35,05	57,02	24,06	158,3
2	81,08	54,65	43,36	95,04
3	68,90	49,45	18,71	68,9
4	15,59	23,17	21,98	59,1
Ponto	Nitrato (mg.L⁻¹)			
1	0,52	0,13	0,82	0,47
2	0,78	0,20	0,85	0,14
3	0,42	0,12	0,73	0,61
4	0,57	0,11	0,67	0,26
Ponto	Nitrito (mg.L⁻¹)			
1	0,03	0,06	0,04	0,43
2	0,03	0,08	0,03	0,16
3	0,10	0,05	0,03	0,02
4	< L.Q.	0,02	0,03	0,01
Ponto	Nitrogênio Amoniacal (mg.L⁻¹)			
1	0,93	0,64	0,95	0,09
2	0,20	0,31	0,46	0,10
3	1,54	0,40	0,25	0,05
4	0,07	< L.Q.	0,21	< L.D.
Ponto	Fósforo Total (PT) (mg.L⁻¹)			
1	0,17	0,36	0,18	0,27
2	0,21	0,18	0,17	0,14
3	0,41	0,15	0,13	0,11
4	0,13	0,08	0,13	0,08

Fonte: Elaborado pela autora, utilizando os padrões estabelecidos em CONAMA (2005).

5.4 Discussão

A análise STI univariada apontou que diversos parâmetros variaram significativamente considerando os períodos de coleta, demonstrando que a hipótese de que a variação sazonal implica em alterações significativas nas variáveis físicas,

químicas e biológicas nas águas do Corpo Central I pode ser aceita. Esta constatação indica a influência da sazonalidade nos parâmetros físicos, químicos e biológico da água deste compartimento do reservatório. A influência da sazonalidade também foi considerada estatisticamente significativa no reservatório de Itupararanga por Cunha e Calijuri (2011), ressaltando a importância da sazonalidade na determinação da qualidade das águas em represas subtropicais.

A variação obtida para a temperatura da superfície da água foi 99% explicada pelos períodos sazonais, segundo a análise STI. Este resultado está coerente com os dados obtidos neste trabalho, considerando que a temperatura da superfície da água é estritamente dependente da temperatura do ar, a qual é superior nos períodos de chuva e menor nos períodos de estiagem. A matriz de correlação também evidenciou uma relação positiva significativa entre a temperatura da superfície da água e a precipitação acumulada nos 30 dias anteriores a cada coleta. Padrão semelhante foi verificado em diferentes estudos realizados na represa Billings (WENGRAT, 2011; CORTEZ, 2013; MOUTINHO, 2016; LAZZARO, 2017; REIS, 2017), como também em outros reservatórios subtropicais (CUNHA & CALIJURI, 2011; CASALI, 2014; LIMA, 2015). Lamparelli (2004) analisou as informações obtidas no “Banco de dados da Rede de Monitoramento de Qualidade das Águas do Estado de São Paulo”, elaborado pela CETESB, compreendendo dados de 22 reservatórios localizados no Estado de São Paulo, e também constatou que houve diferença significativa entre as temperaturas da água entre a estação chuvosa e de seca, relacionando-as como um reflexo da temperatura do ar.

O pH na superfície da d'água foi em média superior nas coletas do período chuvoso, quando comparadas ao de estiagem. Segundo a análise estatística STI, os resultados obtidos para pH foram 50% explicados pelos períodos de coletas. A matriz de correlação também evidenciou uma relação positiva significativa entre o pH e a precipitação acumulada nos 30 dias anteriores a cada coleta, o que corrobora com os resultados encontrados na análise STI. Padrão semelhante foi observado na represa Billings também por Cortez (2013), Moutinho (2016), Reis (2017) e Lazzaro (2017), e também em outros reservatórios subtropicais (CUNHA & CALIJURI, 2011; LIMA, 2015). Nas coletas dos períodos chuvosos, ocorreu a tendência para uma condição mais alcalina das águas, coincidente com as maiores concentrações de clorofila-a.

Resultado semelhante foi observado por Cunha & Calijuri (2011), sendo provavelmente consequência da intensificação do processo de fotossíntese.

A condutividade elétrica é um parâmetro influenciado pela temperatura e pelas concentrações iônicas dissolvidas na água, considerada como uma medida indireta da concentração de poluentes na água. Segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, níveis superiores a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ indicam ambientes impactados (CETESB, 2017). Os valores obtidos para condutividade elétrica no presente estudo foram superiores a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ em todos os pontos e coletas, indicando que as águas superficiais do Corpo Central I estão impactadas, o que é confirmado pelas altas concentrações de nutrientes determinadas e também obtidas por outros autores (WENGRAT, 2011; CARDOSO-SILVA *et al.*, 2014), como também pelo grau de hipertrofia verificado em todos os pontos amostrados. Na matriz de correlação, a condutividade elétrica apresentou relação positiva significativa com os nutrientes nitrito, fósforo total e fósforo total dissolvido, sendo coerente pois uma maior concentração de nutrientes acarreta em maiores concentrações iônicas dissolvidas na água.

A clorofila-a é um indicador da biomassa algal e é um dos pigmentos integrantes do processo de fotossíntese (CETESB, 2017). Comparando os períodos estudados, as concentrações de clorofila-a foram em média superiores no período chuvoso, sendo que essa variabilidade sazonal foi significativa segundo a análise STI. Lamparelli (2004) também obteve diferenças significativas para médias de período chuvoso e de seca para clorofila-a em reservatórios do Estado de São Paulo, sendo as concentrações superiores referentes ao período de chuva.

As concentrações de clorofila-a mais elevadas nas duas coletas do período chuvoso foram obtidas para o ponto 1 de coleta. Este ponto está localizado próximo ao local onde é realizado a reversão do rio Pinheiros. Cortez (2013), nos pontos estudados pertencentes ao Corpo Central I também obteve concentrações de clorofila-a superiores no período chuvoso (fevereiro/2012), sendo a maior concentração encontrada (203,8 $\mu\text{g.L}^{-1}$) no ponto mais próximo ao ponto 1 desta pesquisa.

As concentrações de clorofila-a superiores obtidas nas coletas do período chuvoso indicam uma relação com as menores concentrações de nitrogênio total e nitrato encontradas. Considerando que o nitrato é um dos nutrientes essenciais para

o desenvolvimento dos organismos fotossintetizantes (TUNDISI & TUNDISI, 2008), o resultado encontrado para nitrogênio pode ser reflexo do consumo pela população fitoplactônica.

As concentrações de nitrogênio total e nitrato foram em média superiores no período de estiagem. Na análise STI, os períodos de coleta explicaram 66% da variação obtida nas concentrações de nitrogênio total, e 76% das concentrações de nitrato. Este resultado é corroborado na matriz de correlação, onde as concentrações de nitrato apresentaram relação negativa com a temperatura da água, pH e precipitação com os 30 dias anteriores à coleta, ou seja, parâmetros relacionados com os períodos sazonais, ressaltando que em períodos chuvosos a concentração de nitrato foi menor.

A concentração de nitrogênio amoniacal é um importante parâmetro para classificação de águas naturais pois a amônia, ao ser oxidada biologicamente, consome o oxigênio dissolvido das águas nesta reação. As altas concentrações de nitrogênio amoniacal indicam a existência de uma fonte de poluição próximo ao local de coleta (CETESB, 2017). Concentrações superiores de nitrogênio amoniacal determinadas no ponto 1 (coletas 1 a 3) demonstram a provável influência da reversão das águas do rio Pinheiros, na Usina Elevatória de Pedreira, como provável fonte de poluição. Na comparação das médias das concentrações obtidas por pontos, é perceptível o decaimento da concentração de nitrogênio amoniacal ao longo do perfil longitudinal (concentrações menores no ponto 4 - próximo ao braço Taquacetuba), indicando a influência da reversão na degradação da qualidade da água próximo à entrada de água do rio Pinheiros.

A matriz de correlação evidenciou a relação positiva significativa entre nitrogênio amoniacal com fósforo total e com fósforo total dissolvido. A análise STI indicou que o nitrogênio amoniacal não é distribuído uniformemente entre os pontos, sendo que as diferenças encontradas em sua concentração são 38% explicados pelos períodos de coleta.

Segundo a CETESB (2017), a principal fonte de fósforo nos ambientes aquáticos são as descargas de esgotos sanitários. Portanto, altos valores de fósforo total apontam a existência de descargas de esgotos sanitários sendo despejados, e na maioria das vezes sem tratamento. A matriz de correlação evidenciou a relação positiva significativa entre fósforo total e os nutrientes nitrogênio total, nitrogênio

amoniaco e fósforo total dissolvido, o que evidencia que a entrada de fósforo e nitrogênio no reservatório estão associados.

A concentração de fósforo total no ponto 1 apresentou altas concentrações nos períodos chuvosos (coleta 2 e 4), podendo estar relacionado com uma maior descarga de esgotos sanitários neste local e período. Os dados indicam que no período chuvoso ocorre a entrada de um maior volume de poluição revertida na Usina Elevatória de Pedreira, bem como de outras fontes oriundas do adensamento populacional próximos da represa, carregadas para o reservatório pelas chuvas. Resultado semelhante foi obtido por Wengrat (2011), em seu estudo abrangendo todos os compartimentos da represa Billings, onde as maiores concentrações de fósforo total foram obtidas no período de verão, nos pontos localizados no Corpo Central I. Moutinho (2016) também encontrou altas concentrações de fósforo total no período chuvoso (janeiro de 2015, próximo à $600 \mu\text{g.L}^{-1}$), próximo ao ponto de coleta 2.

O ortofosfato é “a principal forma de fosfato assimilada pelos vegetais aquáticos, microalgas e bactérias” (ESTEVES, 2011). As concentrações de ortofosfato foram em média superiores no período de estiagem, o que foi corroborado pela análise STI univariada, que constatou que a proporção de variabilidade explicada pelos períodos de coletas, para a variável ortofosfato foi de 45%. O período onde as concentrações de ortofosfato foram maiores (coleta 3 – período de estiagem/2017) coincidiu com as menores de concentrações encontradas para clorofila-a, o que indicaria que a menor presença de biomassa fitoplanctônica resultou em um menor consumo, resultando em maiores concentrações deste nutriente dissolvido na água.

Dentre os 13 parâmetros que foram analisados na STI, apenas os parâmetros nitrogênio amoniacal e nitrito apresentaram uma diferença significativa espacial, ou seja, entre os pontos. Portanto, considerando a maioria dos parâmetros, a hipótese de que existe uma alteração significativa na qualidade das águas do Corpo Central I entre os pontos de coleta não pode ser aceita. Como a entrada de poluentes é constante e elevada, o processo de autodepuração não é suficiente para provocar mudanças significativas ao longo do perfil longitudinal estudado, o que é constatado pelo Índice de Estado Trófico, onde todos os pontos foram classificados como hipereutróficos.

A aplicação do Índice de Estado Trófico para reservatórios tropicais/subtropicais (TSI-trs; CUNHA *et al.*, 2013b) evidenciou que as águas do Corpo Central I foram classificadas como hipereutróficas. Este resultado comprova a degradação da qualidade das águas neste compartimento, corroborando resultados na represa Billings obtidos por Wengrat (2011), Cortez (2013), Cardoso-Silva *et al.* (2014), Moutinho (2016), Lazzaro (2017), Reis (2017) e nas análises realizadas pela CETESB (2017).

Os principais parâmetros com concentrações obtidas em não conformidade com a Resolução CONAMA 357/2005 para corpos hídricos de classe II foram o fósforo total, a clorofila-a e o oxigênio dissolvido. Portanto, as águas do Corpo Central I não estão em conformidade com os parâmetros descritos na Resolução CONAMA nº 357/2005.

Na Tabela 11, estão apresentados estudos realizados na represa Billings e as principais não conformidades encontradas pelos referidos autores. Verifica-se que os parâmetros mais frequentemente em não conformidade nestes estudos (PT, Chl-a e OD) são os mesmos encontrados neste trabalho. Os parâmetros citados estão estritamente relacionados principalmente com a entrada de esgotos domésticos e industriais, sem o devido tratamento, na represa Billings.

Cunha *et al.* (2013a) avaliaram as não conformidades segundo os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/2005 para diversos rios e reservatórios do estado de São Paulo de acordo com seus enquadramentos, no período de 2005 a 2009. Estes autores concluíram que as variáveis que apresentaram uma situação mais preocupante foram fósforo total e oxigênio dissolvido, tal como observado para o Corpo Central I da represa Billings. Portanto, a atenção com o aporte de fósforo e a eutrofização nos reservatórios deve ser uma preocupação na gestão dos recursos hídricos não apenas para a represa Billings, mas também para outros reservatórios do Estado de São Paulo.

Considerando que apenas duas amostras obtiveram concentrações para fósforo total em conformidade com os padrões estabelecidos para águas de Classe II pela resolução CONAMA 357/2005, é importante que o poder público realize ações para diminuir a entrada de fósforo no reservatório, derivados principalmente de descargas de esgotos sem tratamento na bacia hidrográfica da Billings, e do bombeamento dos rios Pinheiros e Tietê.

Tabela 11 – Diferentes estudos realizados na represa Billings e as principais não conformidades referentes aos parâmetros estabelecidos na Resolução CONAMA 357/2005.

Autor	Frequência de amostragem	Período de coleta	Compartimento Ambiental APRM-B	Principais não conformidades
Presente estudo (2018)	Semestral	ago/2016 à fev/2018	Corpo Central I	Fósforo Total, Oxigênio Dissolvido, Clorofila-a
Lazzaro (2017)	Semestral	ago/2016 e fev/2017	Corpo Central I (braço grota funda)	Fósforo Total, Oxigênio Dissolvido, Clorofila-a
Moutinho (2016)	Mensal	jun/2014 à jul/2015.	Corpo Central I (braço grota funda)	Fósforo Total, Oxigênio Dissolvido, Clorofila-a
Cortez (2013)	Semestral	ago/2011 e fev/2012	Corpo Central I e Bororé/Taquacetuba	Fósforo Total, Clorofila-a
Nishimura; Moschini-Carlos; Pompêo (2010)	Trimestral	fev/05 à nov/05	Rio Grande/Rio Pequeno (braço do Rio Grande) Bororé/Taquacetuba	Oxigênio Dissolvido Fósforo Total, Oxigênio Dissolvido, Clorofila-a, pH

Fonte: Elaborado pela autora, com dados de: Lazzaro (2017); Moutinho (2016); Cortez (2013); Nishimura, Moschini-Carlos, Pompêo (2010).

O município de São Paulo tem como corpo receptor de seus efluentes os rios Tietê, Pinheiros e Tamanduateí (CETESB, 2017). Os efluentes dos rios Tietê e Pinheiros são revertidos para a represa Billings através da Usina Elevatória de Pedreira. Portanto, o Corpo Central I da represa Billings é um corpo receptor de um grande volume de esgoto oriundo dessas fontes. Os dados da CETESB (2017) de vazão bombeada para o reservatório Billings apontam que os maiores volumes bombeados se concentraram nos meses de janeiro a março, indicado que os bombeamentos acontecem com maior frequência no período chuvoso, como medida paliativa para evitar as enchentes na cidade de São Paulo.

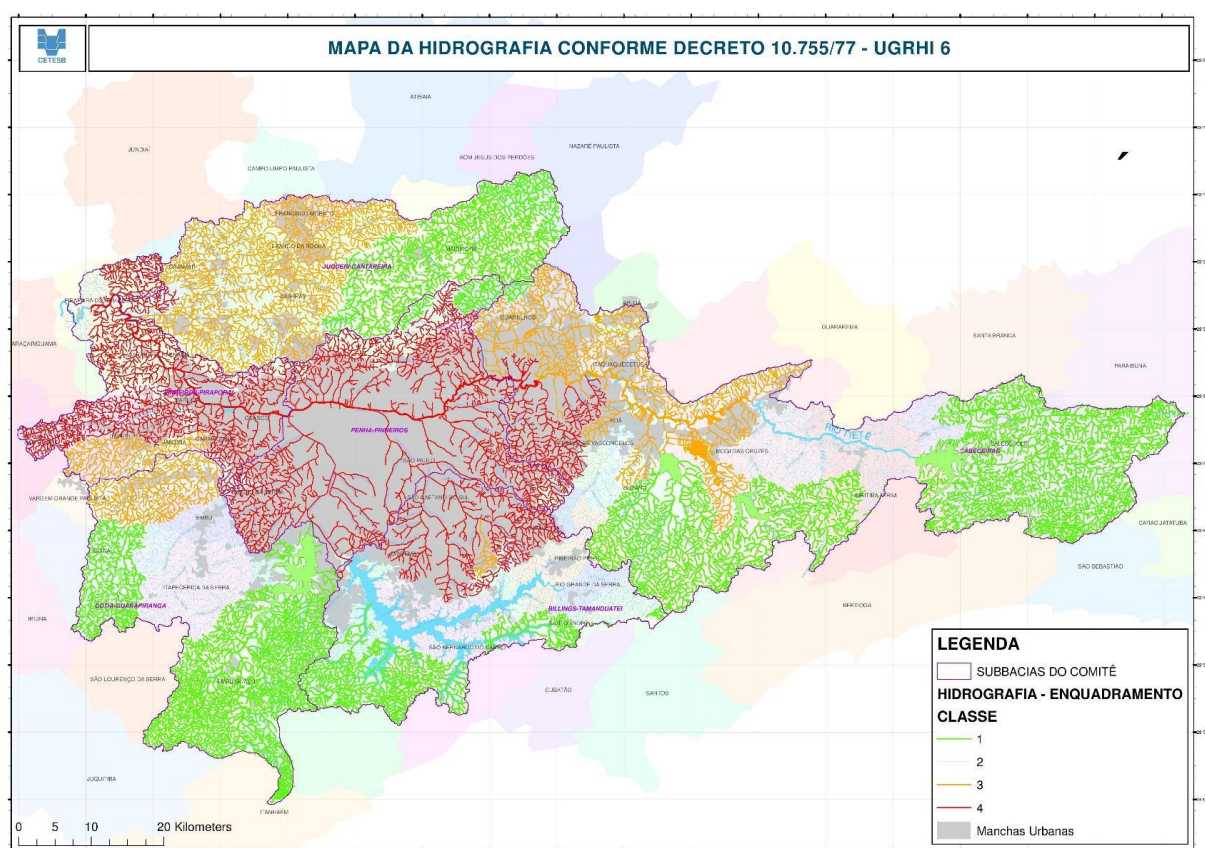
O volume bombeado na Usina Elevatória de Pedreira para o Reservatório Billings no período de julho/2016 a agosto/2017 foi de $205,728 \times 10^6 \text{ m}^3$, cujos dados foram fornecidos pela EMAE em 2018. Esse intervalo de tempo corresponde às coletas 1 a 3 (agosto/2016 a agosto/2017). O volume bombeado médio mensal calculado é de $14,7 \times 10^6 \text{ m}^3$, porém a média calculada não reflete o bombeamento do rio Pinheiros para a represa Billings pontual, considerando que o bombeamento não é constante. Segundo Carmo e Tagnin (2001),

“Há que se considerar também que, durante muitos anos, a reversão de águas do Pinheiros trouxe e, em menor escala continua trazendo, um volume considerável de efluentes provenientes de indústrias localizadas na Bacia do Alto Tietê; e que as indústrias possuem um impacto diferenciado sobre a qualidade da água, uma vez que, mesmo que os volumes não pareçam significativos, a contaminação é mais perigosa em relação àquela causada pelo esgoto doméstico” (TAGNIN & CARMO, 2001, p. 426)

As altas concentrações de nutrientes encontradas no ponto 1 em períodos chuvosos evidenciam a influência da reversão do rio Pinheiros como um importante fator de interferência na qualidade das águas superficiais. Ao considerar os altos volumes bombeados na Usina Elevatória de Pedreira para a represa Billings e as altas concentrações de nutrientes associados ao processo de eutrofização próximos ao ponto 1 nos períodos chuvosos, é possível corroborar com a hipótese de que a reversão do rio Pinheiros é o principal fator para a diminuição da qualidade das águas superficiais do Corpo Central I. Segundo Carmo e Tagnin (2001), a poluição transferida por meio da reversão do rio Pinheiros para a represa Billings era cerca de três vezes superior àquela que se origina das ocupações urbanas da própria Bacia Billings.

Considerando que as classes propostas pela Resolução CONAMA nº 357/2005 representam o nível de qualidade que as águas devem possuir para atender os usos preponderantes propostos pela mesma, é importante destacar que a represa Billings é um reservatório de Classe II que recebe os bombeamentos dos rios Pinheiros e Tietê, de Classe IV (Figura 13).

Figura 13 - Mapa da hidrografia e enquadramento dos corpos hídricos, conforme Decreto 10.755/77 – UGRHI 6 – Alto Tietê.



Fonte: CETESB, 2016.

Este estudo evidenciou que a qualidade da água do Corpo Central I é fortemente impactada através dos bombeamentos dos rios Pinheiros e Tietê para a represa Billings. A Lei Estadual nº 13.579/2009 propõe dentre as diretrizes para o planejamento e gestão do Corpo Central I (artigo 10) a implantação de ações de recuperação e saneamento ambiental e a redução da carga gerada de fósforo da bacia correspondente ao território do Compartimento Ambiental (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2009). Portanto a manutenção do bombeamento implica que não será possível atingir os parâmetros propostos para corpos hídricos de Classe II na Resolução CONAMA nº 357/2005, não permitindo a redução da carga de fósforo.

Considerando que no braço Taquacetuba da represa Billings é realizado a transposição de águas para o reservatório Guarapiranga, de Classe I (CETESB, 2016), a deterioração da qualidade das águas da represa Billings pode causar um impacto negativo na qualidade das águas do reservatório Guarapiranga. Este fenômeno já previsto através de pesquisas realizadas por Nishimura, Moschini-Carlos & Pompêo (2010; 2015).

Uma estratégia para os gestores investirem na recuperação da qualidade das águas do corpo Central da Represa Billings seria a interrupção da reversão do Rio Pinheiros para a Billings, como demonstrado claramente através dos resultados obtidos nesse estudo.

5.5 Conclusões

Considerando os objetivos e resultados obtidos neste capítulo, concluiu que:

- O Índice de Estado Trófico para reservatórios tropicais/subtropicais (TSI-trs) permitiu caracterizar o Compartimento Ambiental Corpo Central I como hipereutrófico, em todos os pontos coletados e períodos estudados;
- Diversos parâmetros ambientais analisados variaram significativamente entre os períodos de coleta (estiagem e chuvoso), evidenciando a influência da sazonalidade na variação da qualidade das águas deste compartimento do reservatório;
- Não houve variação significativa para a maioria das variáveis físicas, químicas e biológicas entre os pontos de coleta (perfil longitudinal) na superfície das águas do Corpo Central I.
- Os principais parâmetros com concentrações obtidas em não conformidade com a Resolução CONAMA 357/2005 para corpos hídricos de classe II foram o fósforo total, a clorofila-a e o oxigênio dissolvido.
- O principal fator de deterioração da qualidade das águas do corpo central I advém dos bombeamentos dos rios Pinheiros e Tietê para a represa Billings.
- A suspensão da reversão dos rios Pinheiros e Tietê para a represa Billings traria uma melhoria da qualidade de suas águas, viabilizando o seu reenquadramento para a Classe II (Resolução CONAMA 357/2005).

6 Capítulo II – Mapeamento do uso e ocupação da terra e da vegetação aquática do Corpo Central I da Represa Billings: sua relação com a qualidade da água

Resumo:

O Corpo Central I é um compartimento ambiental pertencente à represa Billings, um reservatório urbano eutrófico utilizado para abastecimento público na Região Metropolitana de São Paulo. O objetivo deste capítulo é de mapear o uso e cobertura da terra e a distribuição espacial da vegetação aquática neste setor do reservatório em dois períodos: estiagem (2016 e 2017) e chuvoso (2017 e 2018), e discutir a relação entre os parâmetros de qualidade das águas superficiais obtidas neste compartimento. A delimitação das microbacias hidrográficas foi realizada utilizando os dados de altitude do Topodata e o algoritmo “*r.Watershed*” do *software GRASS GIS*. As classificações foram realizadas utilizando imagens do satélite Landsat-8, o *Semi-automatic Classification Plugin* e o *software QGIS*, com aplicação do método supervisionado Máxima Verossimilhança. A classe predominante segundo a área é de “área urbana” (66%) seguida pela classe “vegetação terrestre” (32%). A sazonalidade (períodos de chuva e estiagem) não evidenciou um padrão de distribuição espacial de vegetação aquática na represa. No ano de 2017, em ambos os períodos (chuvoso e estiagem), ocorreram maiores áreas ocupadas por vegetação aquática, o que diferenciou este ano dos outros períodos estudados. Nos períodos de estiagem, as concentrações de nutrientes evidenciam existência do aporte de poluição proveniente da entrada de esgotos sem tratamento no reservatório, principalmente nos pontos 2 e 3. Nos períodos chuvosos, as concentrações de nutrientes evidenciam o aporte de poluição revertida pela Usina Elevatória de Pedreira, no ponto 1.

Palavras-chave: QGIS, LANDSAT-8, Classificação supervisionada, Eutrofização, Reservatório urbano.

6.1 Introdução

Os reservatórios da Região Metropolitana de São Paulo são pressionados continuamente por impactos como: ocupações urbanas extensas, fontes pontuais e não pontuais de nitrogênio e fósforo, desmatamento, descarga de resíduos sólidos, degradação das margens e da zona litorânea, entre outros (TUNDISI & TUNDISI, 2008), acarretando no aumento dos custos de tratamento de água em áreas urbanas, que dependem da qualidade da água em sua fonte, a qual está relacionado com o uso do solo na bacia hidrográfica de origem (MCDONALD *et al.*, 2016). No Brasil, atualmente a gestão dos recursos hídricos é organizada por bacias hidrográficas: a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) define que a bacia hidrográfica é a unidade territorial para sua implementação e tem como um de seus objetivos “assegurar a atual e as futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos” (BRASIL, 1997).

Bacia hidrográfica é definido por Tucci (2009) como “uma área de captação natural da água de precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório”, e o que ocorre neste ponto de saída é consequência das formas de ocupação do território (PORTO & PORTO, 2008). Os corpos hídricos podem ser impactados de forma negativa nas suas respectivas bacias hidrográficas devido à forma que se deu o uso e cobertura da terra, principalmente causado pela impermeabilização da superfície; ausência de coleta e tratamento de esgotos os quais são lançados sem tratamento na água; ausência de coleta de lixo, sendo estes depositados ou carreados para os corpos hídricos, entre outros (TUCCI E MENDES, 2006).

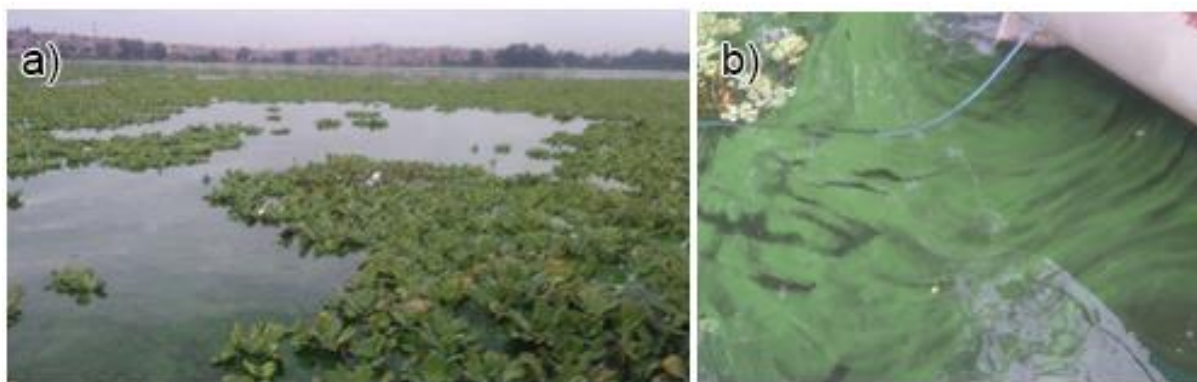
Segundo Silva e Porto (2003), a ocupação urbana descontrolada em áreas de mananciais é uma grande ameaça a eles, pois causa riscos de poluição e contaminação de suas águas. Esta ocupação está historicamente relacionada à população de baixa renda, que sem conseguir locais para residir nas áreas centrais das cidades, passaram a ocupar as zonas periféricas, desordenadamente e agravando a degradação ambiental (SILVA & PORTO, 2003). Nessas áreas existe uma deficiência em infraestrutura urbana, o que demanda a necessidade de expandir os serviços de saneamento, como abastecimento de água, coleta de esgotos sanitários e lixo (SILVA & PORTO, 2003).

Estes impactos ocasionam uma maior entrada de nutrientes no reservatório, como nitrogênio e fósforo, que por sua vez podem causar um problema ambiental conhecido como eutrofização artificial. Uma das principais consequências da eutrofização é o aumento do crescimento de macrófitas e fitoplâncton, podendo causar “*blooms*” ou florações (CETESB, 2013), que é definido como o crescimento excessivo destes organismos nas águas.

As macrófitas são plantas aquáticas que podem interferir de diferentes maneiras na dinâmica desses ecossistemas, pois constituem a principal comunidade produtora de biomassa vegetal em ambientes aquáticos (ESTEVES, 2011). Segundo Tundisi e Tundisi (2008), as macrófitas aquáticas podem ocupar uma grande área do reservatório e causar prejuízos à geração de energia e à navegação.

A comunidade fitoplanctônica é composta por um grupo diverso de microrganismos fotossintetizantes que vivem em suspensão na coluna d’água e juntamente com as macrófitas aquáticas são responsáveis pela produção primária de matéria orgânica nos ecossistemas aquáticos (CALIJURI *et al.*, 2007) (Figura 14). Dentre os grupos de microrganismos que fazem parte do fitoplâncton, as cianobactérias tendem a dominar em ambientes eutrofizados. Alguns gêneros produzem substâncias tóxicas, conhecidas como cianotoxinas, que podem afetar a saúde dos seres humanos e podem causar a mortandade e intoxicações de animais (TUNDISI, 2003).

Figura 14 – Florações de a) macrófitas, e b) fitoplâncton, na represa Billings.



Fonte: Acervo do Laboratório de Ecofisiologia e Monitoramento Ambiental da UNIFESP/DIADEMA.

Portanto existe a necessidade de detectar e monitorar as florações de fitoplâncton e macrófitas, principalmente em reservatórios utilizados para

abastecimento público devido a possibilidade de presença de cianobactérias. Palmer, Kutser e Hunter (2015) afirmam que o sensoriamento remoto tem o potencial de fornecer uma inestimável fonte complementar de dados para o monitoramento de águas interiores de escala local à global. Diversos autores utilizaram em seus estudos imagens de sensores remotos no estudo de ambientes aquáticos, considerando questões como a delimitação de bacias hidrográficas (SOBRINHO *et al.*, 2010), caracterização do uso e cobertura da terra (MESQUITA, CRUZ, 2014; MELLO, ALVES, LOVERDE-OLIVEIRA, 2016), estudo de padrão e distribuição de florações de fitoplâncton (LOBO *et al.*, 2017), macrófitas (GUASSELLI, MARQUES, 2006; VIRGILIO *et al.*, 2013; LIMA *et al.*, 2017), e cianobactérias em reservatórios (OGASHAWARA *et al.*, 2014), entre outros.

O objetivo deste capítulo é discutir a relação entre a qualidade das águas superficiais do Corpo Central com a presença de vegetação aquática neste setor do reservatório e o uso e cobertura da terra nas microbacias hidrográficas. Os objetivos específicos deste capítulo são: a) identificar as classes de uso e cobertura da terra nas diferentes microbacias hidrográficas da área estudada (Corpo Central I – represa Billings) a fim de contextualizar a área estudada; b) mapear a distribuição espacial da vegetação aquática neste setor do reservatório; c) verificar se há variação sazonal entre os períodos de estiagem e chuva, na ocorrência de vegetação aquática neste setor do reservatório; d) comparar os parâmetros de qualidade das águas superficiais do Corpo Central I determinados neste estudo e relacionar com a presença de vegetação aquática neste setor do reservatório.

6.2 Materiais e Métodos

6.2.1 Coleta de dados

6.2.1.1 Imagens de satélite

As imagens de sensoriamento remoto foram obtidas no catálogo de imagens do projeto *Earth Explorer* do Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey* - USGS). Utilizou-se imagens do satélite Landsat-8 - instrumento imageador *Operational Land Imager* (OLI), obtidas na Órbita (*Path*) 219 e Ponto (*Row*) 76.

Entre as características do Landsat-8 pode-se citar a resolução espectral de 11 bandas, resolução temporal de 16 dias e resolução espacial de 30 e 15 metros para as bandas utilizadas (ROY *et al.*, 2014). Como as imagens do satélite Landsat-8 são disponibilizadas em reflectância de superfície (R) e ortorretificadas pela USGS/NASA (USGS, 2016), não foi necessário realizar o georreferenciamento.

Para possibilitar a comparação dos parâmetros de qualidade da água e mapeamento da vegetação aquática, seria necessário obter as amostras de água in situ de mesma data ao imageamento pelo satélite. A programação das datas de coleta foi realizada considerando as datas de passagem do satélite, porém, nas datas de coleta houve presença de nuvens cobrindo a área de estudo nessas ocasiões. Considerando essa limitação, as imagens foram escolhidas em datas próximas às de coleta de água e com baixa cobertura de nuvens na área de estudo (Tabela 12).

Tabela 12 – Datas de coleta, período de referência e a respectiva data e ID da imagem Landsat-8 utilizada neste trabalho.

Coleta	Período de referência	Data da imagem Landsat-8	Data da coleta	Diferença entre imagem e coleta (em dias)	Porcentagem de nuvens na cena
1	Estiagem/2016	07/07/2016	09/08/2016	33	0,53
2	Chuvoso/2017	16/02/2017	31/01/2017	16	6,65
3	Estiagem/2017	26/07/2017	02/08/2017	7	0,17
4	Chuvoso/2018	18/01/2018	02/02/2018	15	27,85

Fonte: Elaborado pela autora com informações obtidas no USGS.

6.2.1.2 Demais dados espaciais

A delimitação dos compartimentos ambientais da represa Billings foi obtida por meio do arquivo vetorial (extensão *shapefile*) disponível na plataforma “Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do Estado de São Paulo” - DataGEO SP.

Os dados de altitude utilizados foram obtidos através do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), que foram processados e disponíveis no Banco de dados geomorfométricos do Brasil (projeto TOPODATA) do INPE (Instituto Nacional

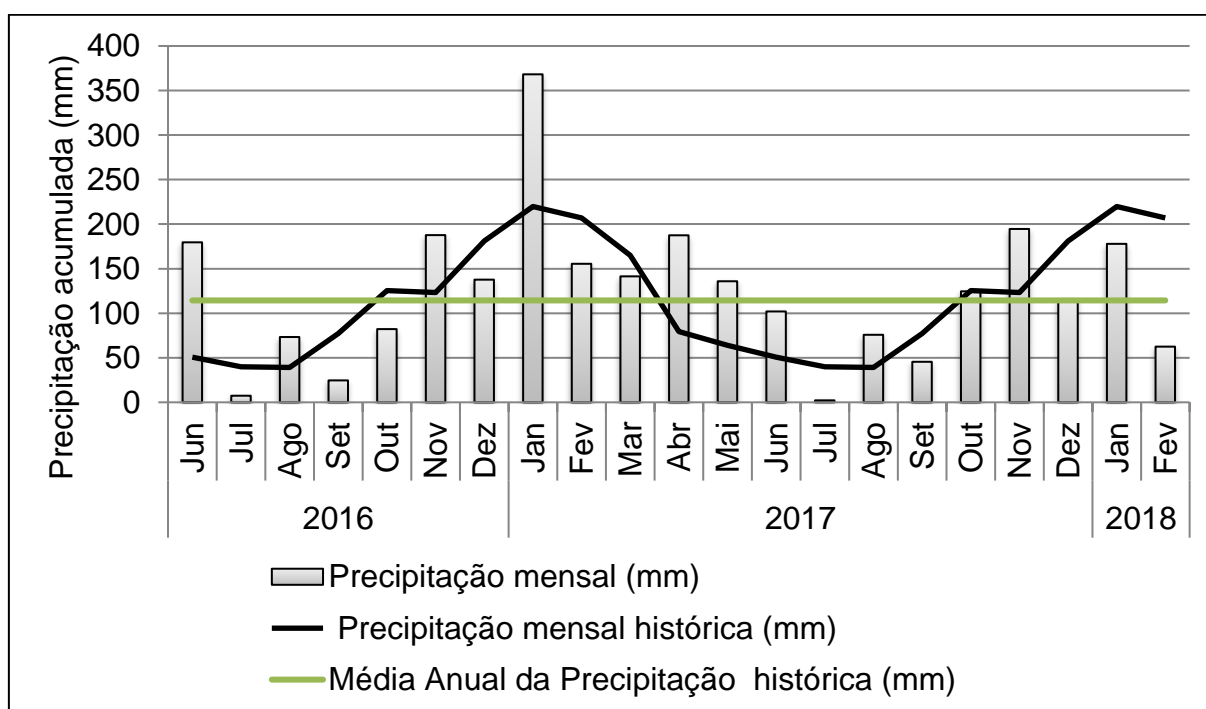
de Pesquisas Espaciais) (INPE, 2009). A área de estudo correspondente às folhas “23S48_” e “23S465” do projeto TOPODATA.

O *software* utilizado para o processamento digital de imagens foi o Quantum GIS (QGIS) versão 2.18 - Las Palmas, escolhido por ser um *software* gratuito e que possibilita o uso de todas as ferramentas necessárias para a realização deste estudo.

6.2.1.3 Dados meteorológicos

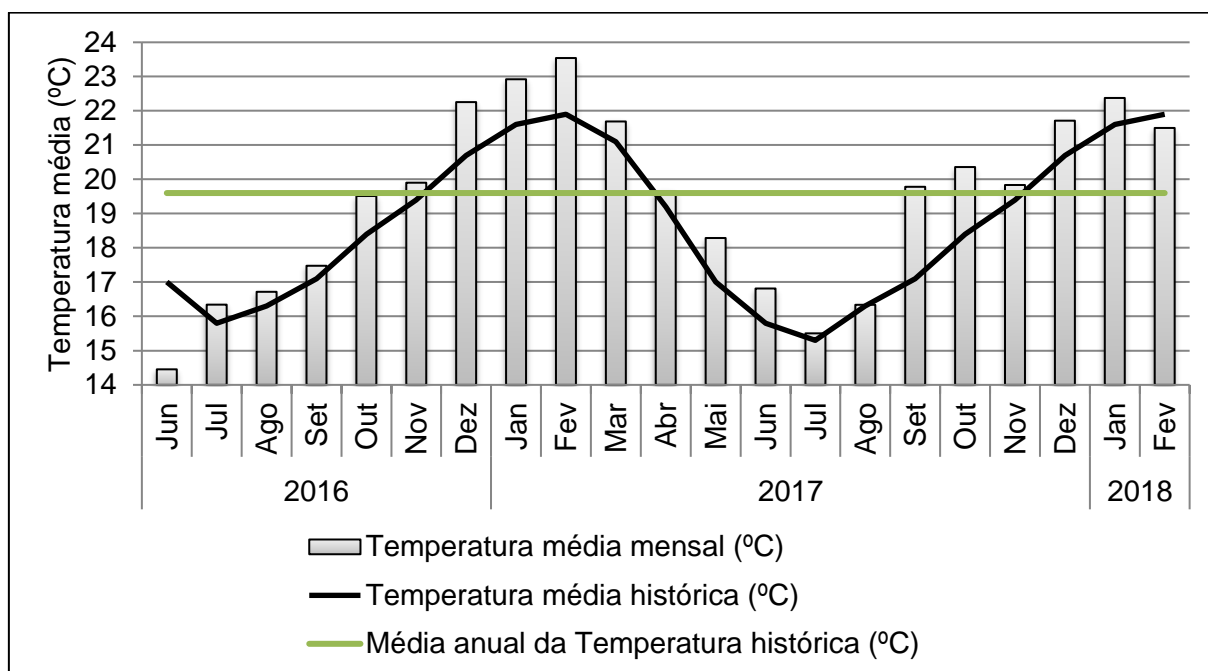
A Figura 15 apresenta os dados de precipitação acumulada e a precipitação mensal histórica, e a Figura 16 apresenta os dados de temperatura média (°C), entre os meses de junho de 2016 e fevereiro de 2018, referentes à Estação Meteorológica do IAG/USP.

Figura 15 – Distribuição da precipitação mensal acumulada entre os meses de junho de 2016 e fevereiro de 2018, e precipitação mensal histórica (média 1933-2002), na Estação Meteorológica do IAG-USP (São Paulo, SP).



Fonte: Elaborado pela autora. Dados da Estação Meteorológica do IAG/USP.

Figura 16 – Distribuição da temperatura média mensal entre os meses de junho de 2016 e fevereiro de 2018, e temperatura mensal histórica (média 1933-2002), na Estação Meteorológica do IAG-USP (São Paulo, SP).



Fonte: Elaborado pela autora. Dados da Estação Meteorológica do IAG/USP.

6.2.2 Processamento e análise dos dados

2.2.1 Delimitação de microbacias hidrográficas

Para realizar a delimitação de bacias utilizando os dados de altitude do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) disponibilizados na plataforma TOPODATA, primeiramente foi necessário preparar estes dados no *software* Quantum GIS. O mosaico com as duas folhas foi realizado utilizando a ferramenta “Mesclar”. O arquivo raster resultante foi reprojetoado para sistema plano UTM 23S com sistema de coordenadas WGS 84, através da ferramenta “Raster - reprojetoar coordenadas”. Foi realizado o recorte deste mosaico compreendendo os municípios que fazem parte da APRM-Billings, resultando em um modelo digital de elevação (MDE) que compreende a área da bacia hidrográfica da represa Billings.

Utilizando este MDE, a delimitação das microbacias hidrográficas foi realizada a partir do algoritmo “*r.Watershed*” - Programa de criação de bacias hidrográficas do *Geographic Resources Analysis Support System GIS* (GRASS GIS) versão 7 (GRASS DEVELOPMENT TEAM, 201-). Para definir o tamanho mínimo exterior para bacia

hidrográfica utilizado no algoritmo, foram realizados testes utilizando os valores de 500, 5.000, 10.000, 15.000, 20.000, 25.000 e 50.000 pixels. O valor escolhido e utilizado no algoritmo foi de 20.000 pixels, por resultar em microbacias com tamanho adequado ao estudo.

A partir desta delimitação foram escolhidas as microbacias hidrográficas que abrangem o Compartimento Ambiental Corpo Central I, comparando com o arquivo vetorial de delimitação deste compartimento. O resultado em formato raster de microbacias hidrográficas foi convertido para vetor por meio do algoritmo “*r.to.vect*”.

A partir do arquivo vetorial das microbacias hidrográficas resultante deste processo, utilizou-se o arquivo vetorial de delimitação do reservatório (GEOSAMPA, 2015), por meio das ferramentas de geoprocessamento de vetores do QGIS, para obter dois arquivos vetoriais: áreas terrestres e de represa. Esses arquivos vetoriais gerados para “áreas terrestres” e “represa” foram utilizados como delimitação das áreas para a realização das classificações descritas a seguir.

2.2.2 Classificação de uso e cobertura da terra

O mapeamento de uso e cobertura da terra da microbacia delimitada, considerando apenas a área terrestre foi realizado utilizando a imagem do satélite LANDSAT-8 correspondente ao dia 07/07/2016, representando a superfície terrestre no início do período estudado.

Os mapas de classificação de cobertura do corpo hídrico pertencente ao compartimento estudado foram realizados baseado em quatro imagens de satélite, referentes aos períodos de coleta de água realizados.

Utilizou-se a extensão *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP), versão 5.2.2 Kourou (CONGEDO, 2016) do QGIS para a realização das seguintes etapas:

- Pré-processamento:

Consistiu em preparar as imagens para a realização da classificação, seguindo as etapas de aquisição das imagens do satélite Landsat-8, *Pan-sharpening* e correção atmosférica (simultaneamente, pois estes dois processos dependem do metadados da imagem), adequação da projeção das imagens, uniformização dos dados e recorte da área de estudo, sendo que essas etapas estão descritas a seguir:

a) Afinamento da resolução espacial das imagens: O afinamento da resolução espacial das imagens para 15 metros foi realizado através da técnica *Pan-sharpening*, que combina dados multiespectrais de resolução média com dados pancromáticos de maior resolução para criar uma imagem multiespectral com recursos de maior resolução espacial (USGS, 201-). No caso da imagem Landsat-8, combina-se os dados das bandas 2 à 7 de resolução espacial de 30 metros (multiespectrais) com a banda 8 de resolução espacial de 15 metros (pancromática). O *Pan-sharpening* foi realizado por meio da ferramenta “*Preprocessing/Landsat*” do SCP.

b) Correção atmosférica: Para minimizar os efeitos atmosféricos foi realizada a correção atmosférica, que segundo SANCHES *et al.*, 2011:

“A correção atmosférica de imagens de satélite é feita com a intenção de minimizar os efeitos atmosféricos na radiância de uma cena, visto que a atmosfera, por causa dos fenômenos de espalhamento, absorção e refração da energia eletromagnética, afeta a radiância refletida pela superfície que é captada pelo sensor. [...] O método de correção atmosférica DOS (Dark Object Subtraction) proposto por Chavez (1988 e 1989) é um método de correção do espalhamento atmosférico no qual a interferência atmosférica é estimada diretamente a partir dos números digitais (ND) da imagem de satélite, sendo ignorada a absorção atmosférica. Para a aplicação desta técnica não há a necessidade de se obter dados sobre as condições atmosféricas na data de obtenção das imagens.” (SANCHES *et al.*, 2011. p. 7564-7565);

A Correção atmosférica pelo método *Dark Object Subtraction* (DOS1) foi realizada por meio da ferramenta “*Preprocessing/Landsat*” do SCP.

c) Reprojeção das imagens para o hemisfério sul: As bandas da imagem Landsat-8 foram reprojadas para hemisfério sul no sistema de referência de coordenadas - UTM 23-Sul - Universal Transversa de Mercator e Datum WGS 84, utilizando a ferramenta “Reprojetar coordenadas” do *Software QGIS* versão 2.18.

d) Uniformização dos dados espaciais: Os arquivos vetoriais e raster utilizados foram reprojados para o mesmo sistema de referências das imagens do satélite Landsat-8, pois foram disponibilizadas ortorretificadas no sistema de referência WGS 84, visando a otimização e padronização das operações.

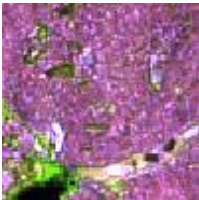





e) Recorte da imagem: O recorte da imagem abrangendo a área de estudo foi realizado utilizando o arquivo *shape* de delimitação da área terrestre das microbacias hidrográficas que abrangem o compartimento ambiental Corpo Central I.

f) Composição colorida: As bandas do satélite Landsat-8 são disponibilizadas em tons de cinza. A ferramenta de composição colorida, segundo Figueiredo (2005, p. 21), “é produzida [...] atribuindo-se as cores primárias (vermelha, verde e azul), a três bandas espectrais quaisquer”. Para possibilitar a análise da imagem e atribuir às classes de interesse, a composição colorida foi elaborada utilizando as bandas R6G5B4 da imagem Landsat-8/OLI através ferramenta “*Bandset*” do SCP. Essa composição R6G5B4 foi escolhida por destacar bem as classes de interesse, apresentando a ocupação urbana em tons de magenta, a água em cor preta, e a vegetação em cor verde.

- Análise e classificação da imagem:

a) Escolha de classes: A análise da imagem e escolha das classes de interesse para a classificação foi realizada, sendo descrito os parâmetros estabelecidos para classificação a seguir na Tabela 13 para as áreas terrestres e Tabela 14 para as classificações de corpo hídrico.

Tabela 13 - Classes de uso e cobertura da terra utilizadas no mapeamento das microbacias hidrográficas que abrangem o compartimento ambiental Corpo Central I da represa Billings.

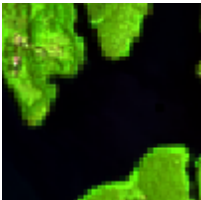

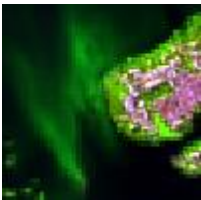



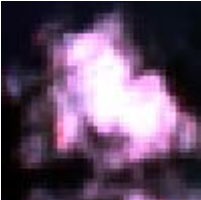
Áreas terrestres	Classe de uso e cobertura da terra	Descrição	Imagem Landsat-8 R6G5B4	Tonalidade/Cor, textura e formas ¹ (R6G5B4)	Registro fotográfico
	Área urbana	Áreas com edificações, vias de acesso e adensamento urbano		Cor em tons de magenta (paleta ² R:35 G:39 B:47), textura rugosa, forma geométrica	
	Solo exposto	Áreas com remoção de cobertura vegetal e áreas urbanas com exposição de solo		Cor rosada com variações de magenta à esbranquiçada (paleta ² R:68 G:79 B:95), textura lisa, forma geométrica	
	Vegetação terrestre	Áreas com fragmentos florestais, aglomerados arbóreos, usos agrossilvopastoris, cobertura herbácea e arbustiva		Cor em tons de verde claro e escuro (paleta ² R:26 G:24 B:22), com textura lisa à rugosa	

Fonte: Elaborado pela autora, utilizando o *software* QGIS e imagem LANDSAT-8 (amostra da imagem), Florenzano (2007), IDRISI Selva (paleta de cores), e fotos do acervo da autora, de Cláudio Milz e Parque dos Búfalos [201-].

¹ Classificação de Florenzano, 2007.

² Paleta de cores do *software* IDRISI Selva.

Tabela 14 - Classes de uso e cobertura do corpo hídrico utilizadas no mapeamento do compartimento ambiental Corpo Central I da represa Billings, realizado neste estudo.

		Classes	Descrição	Imagem Landsat-8 R6G5B4	Tonalidade/Cor, textura e formas (R6G5B4)	Registro fotográfico
Represa		Água	Área ocupada pela água da Represa Billings		Cor preta (paleta R:26 G:24 B:22), com textura lisa, apresentando contornos sinuosos com as áreas terrestres	
		Vegetação em zona limnética	Área ocupada por macrófitas flutuantes e fitoplâncton presentes na zona limnética da represa Billings (exceto na Zona Litorânea)		Cor verde (paleta R:28 G:89 B:30), textura lisa, formando manchas difusas na água (cor preta)	
		Vegetação em zona litorânea	Área ocupada por macrófitas enraizadas e fitoplâncton, localizadas nas margens da represa		Cor verde (paleta R:27 G:108 B:48), textura lisa, destacando um efeito de borda entre a água (cor preta) e a área terrestre	
		Nuvens	Área coberta por nuvens, impossibilitando a identificação da classe.		Cor branca arroxeadada, textura lisa, contornos arredondados	-

Fonte: Elaborado pela autora, utilizando o *software* QGIS e imagem LANDSAT-8 (amostra da imagem), Florenzano (2007), IDRISI Selva (paleta de cores), e fotos do acervo da autora.

b) Classificação supervisionada: Foi realizada pelo método Máxima Verossimilhança (MAXVER; *Maximum Likelihood*), utilizando o SCP. O MAXVER é um método pixel a pixel, que utiliza parâmetros estatísticos e considera a ponderação das distâncias entre as médias dos níveis digitais das classes (SPRING, 2006).

Para as áreas de treinamento utilizadas na classificação foram escolhidos polígonos *ROI* (*Regions of interest* – regiões de interesse), selecionando pixels com assinaturas espectrais das classes de interesse por meio do SCP. Foi utilizado um total de 20 *ROI*'s, segundo os critérios apresentados na Tabela 13 para as áreas terrestres, e 10 *ROI*'s, segundo os critérios apresentados na Tabela 14 para as áreas de represa.

- Correção da classificação:

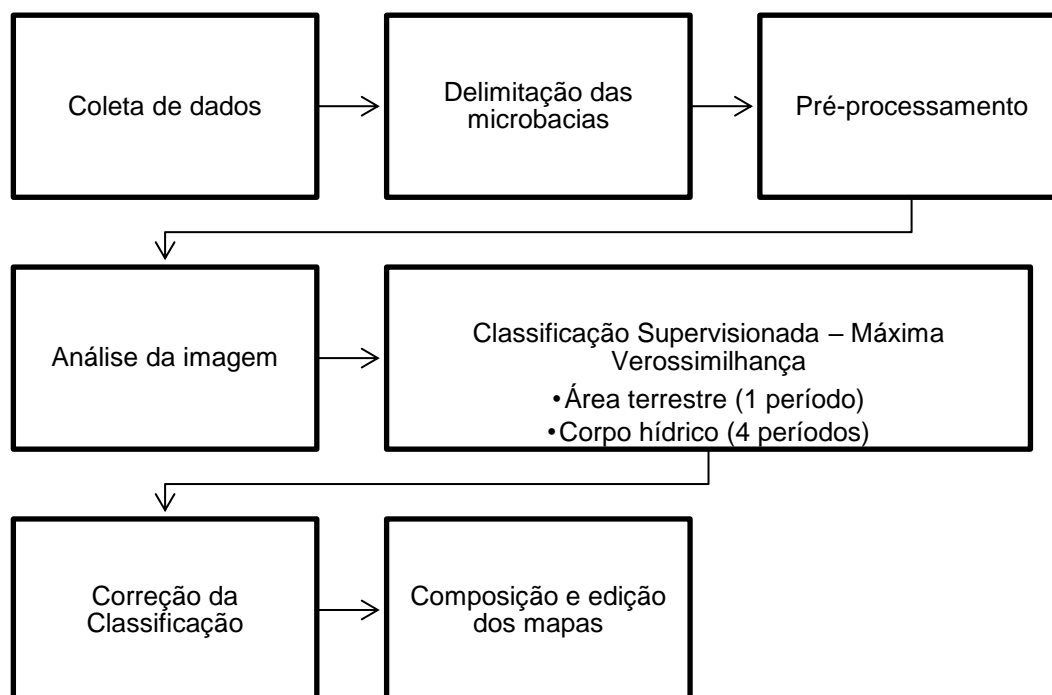
a) Correção da classificação: as correções da classificação foram realizadas baseadas na interpretação visual da composição colorida, utilizando a ferramenta “*Edit Raster*” do SCP.

b) Coeficiente Kappa: A avaliação da exatidão da classificação foi realizada utilizando o coeficiente Kappa, com 20 amostras aleatórias obtidas no QGIS e utilizando como verdade terrestre o “Imagens Rapideye 2013/2014” (resolução espacial de 5 metros) disponível no DATAGEO, através da ferramenta “*Accuracy*” do SCP (LANDIS & KOCH, 1977). O coeficiente Kappa apenas foi calculado para o mapeamento supervisionado de áreas terrestres.

c) Cálculo das áreas das classes: este cálculo foi realizado para comparar a porcentagem e área ocupada por cada classe, nas diferentes microbacias, utilizando a ferramenta “*Classification Report*” do SCP. Este cálculo também foi realizado para quantificar a área ocupada por cada classe, em cada microbacia.

A Figura 17 apresenta o resumo metodológico que apresenta as diferentes etapas de elaboração dos mapas.

Figura 17 – Resumo metodológico: fluxograma de elaboração dos mapas.



Fonte: Elaborado pela autora.

6.2.3 Parâmetros de qualidade da água

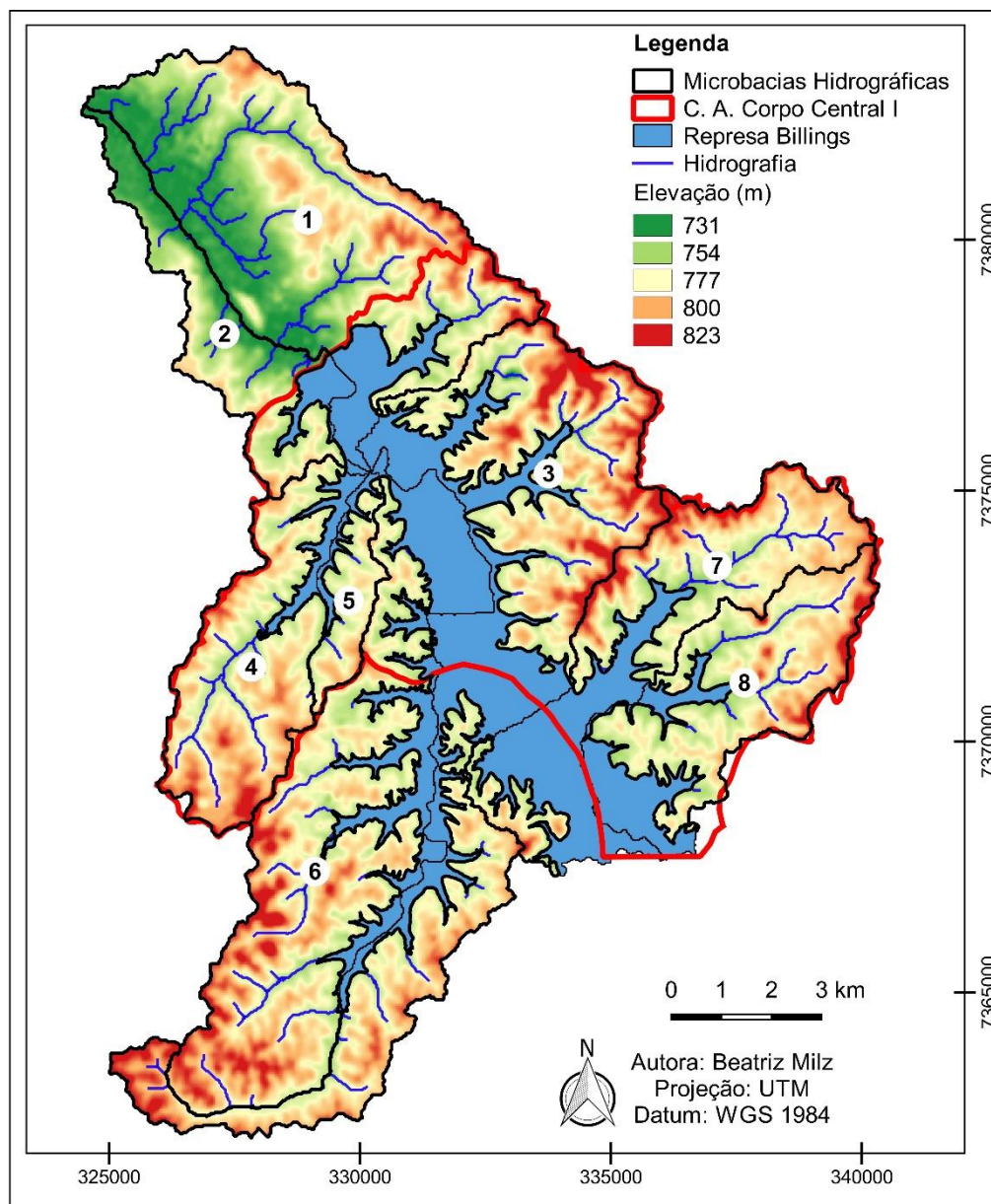
A metodologia de obtenção dos dados limnológicos está descrita no Capítulo I deste trabalho. Os dados limnológicos foram representados nos mapas de uso e cobertura da terra para áreas terrestres e de corpo hídrico para possibilitar uma comparação e discussão sobre a relação entre estes parâmetros.

6.3 Resultados

6.3.1 Delimitação das microbacias

A delimitação das microbacias hidrográficas que abrangem o Compartimento Ambiental Corpo Central I, através do algoritmo “*r. Watershed*” teve como resultado oito microbacias, representadas na Figura 18 incorporadas na área de estudo. As informações referentes à área ocupada pela microbacia, porcentagem da área total, e municípios a qual pertence, estão indicadas na Tabela 15.

Figura 18 - Delimitação das microbacias hidrográficas correspondentes ao Corpo Central I da represa Billings, resultante da aplicação do algoritmo “*r.Watershed*”.



Fonte: Elaborado pela autora utilizando o *Software QGIS*, e dados de DATAGEO (2015); INPE (2009).

Tabela 15 – Microbacias delimitadas pertencentes ao Corpo Central I da represa Billings e a área ocupada, e municípios a qual pertencem.

Microbacia	Área (km²)	Porcentagem ocupada da área total (%)	Municípios
1	31,35	18,45	São Paulo
2	9,91	5,83	São Paulo
3	40,82	24,02	São Paulo, Diadema, São Bernardo do Campo
4	15,06	8,86	São Paulo
5	3,8	2,24	São Paulo
6	32,55	19,15	São Paulo, Diadema, São Bernardo do Campo
7	20,21	11,89	São Paulo, Diadema, São Bernardo do Campo
8	16,24	9,56	São Bernardo do Campo

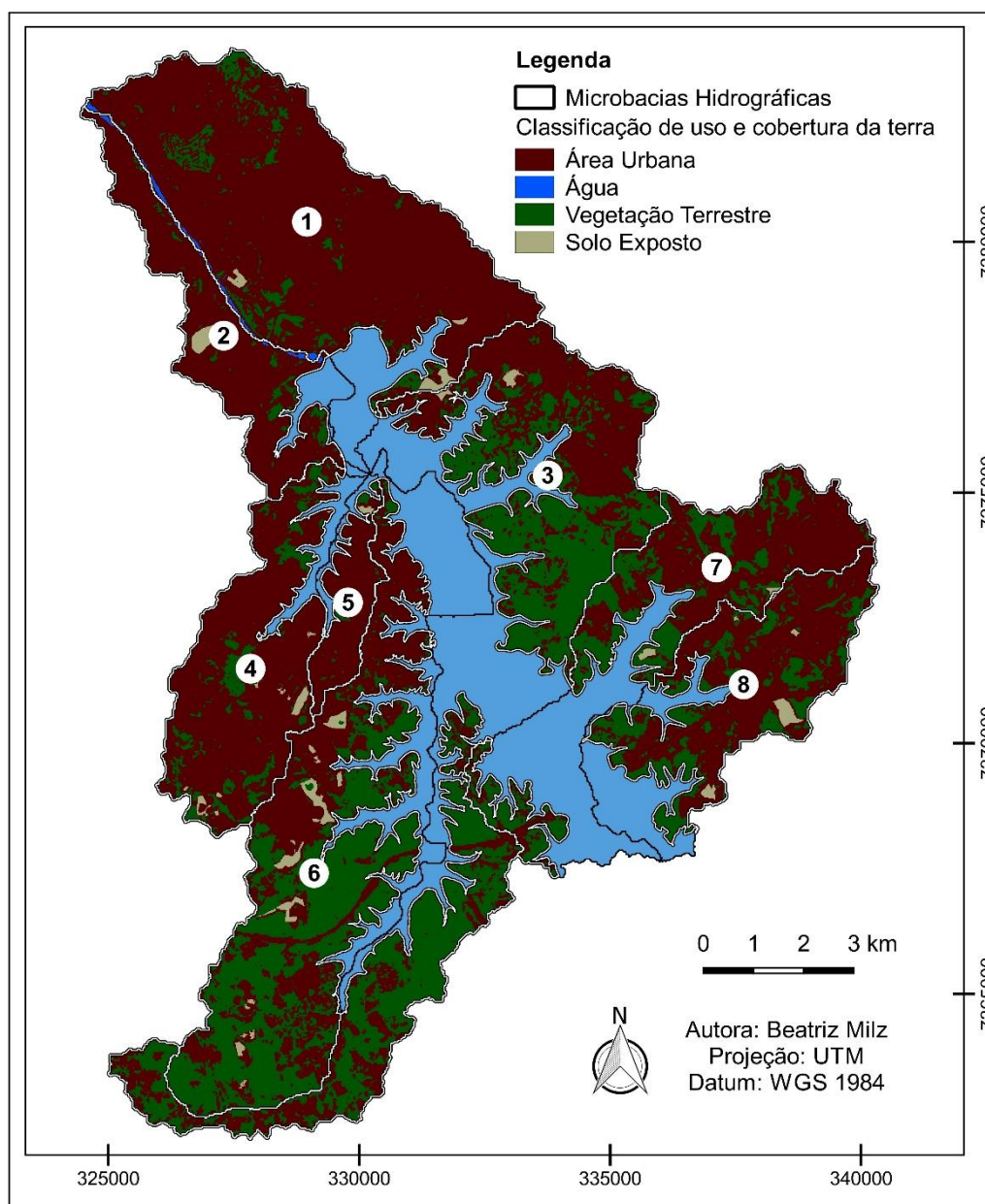
Fonte: Elaborado pela autora, utilizando dados do *Software QGIS*, DATAGEO (2015); INPE (2009); e USGS (2016).

6.3.2 Classificação de áreas terrestres

A partir da delimitação das microbacias hidrográficas, foi realizada a classificação de uso e cobertura da terra elaborada para áreas terrestres, que está representada na Figura 19. A área ocupada em cada classe está detalhada na

Tabela 16 e na Figura 20. O coeficiente Kappa para esta classificação teve como resultado um valor de 0,78, sendo então uma classificação boa, de acordo com a classificação proposta por Landis e Koch (1977).

Figura 19 - Mapa de uso e cobertura da terra para as áreas terrestres das microbacias delimitadas pertencentes ao Corpo Central I da represa Billings.



Fonte: Elaborado pela autora utilizando o *Software QGIS*, dados do projeto Topodata do INPE (2009), USGS (2016), Congedo (2016).

Tabela 16 - Área, em km² e em porcentagem, ocupada por cada classe de uso e cobertura da terra, para a classificação terrestre da área de estudo (Corpo Central I da represa Billings), separadas por microbacia.

Microbacia	Área urbana		Vegetação terrestre		Solo exposto	
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
1	25,8	92%	2,1	7%	0,3	1%
2	7,9	92%	0,5	6%	0,2	2%
3	12,9	43%	16,9	56%	0,1	0%
4	11,7	85%	1,9	14%	0,2	1%
5	3,0	93%	0,2	6%	0,0	1%
6	11,1	45%	12,9	52%	0,6	2%
7	8,4	64%	4,7	36%	0,1	1%
8	8,7	69%	3,7	29%	0,3	2%
Área total	89,5	66,5%	42,9	31,9%	1,7	1,3%

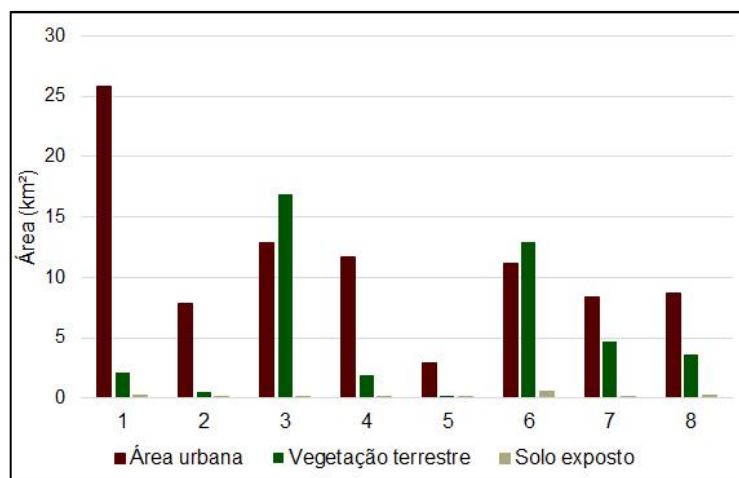
Fonte: Elaborado pela autora.

A classificação de uso e cobertura da terra evidenciou que a classe predominante de cobertura da área de estudo é a “área urbana”, ocupando 66,49% da área terrestre estudada. A vegetação terrestre foi a classe com a segunda maior área ocupada (31,87%). A classe de solo exposto foi pouco significativa, representando 1,28% da área ocupada.

As microbacias 1, 2, 4 e 5 apresentaram um predomínio em área da classe “área urbana”, variando entre 85% a 93% de área ocupada por essa classe.

As microbacias 3 e 6 apresentaram uma área ocupada majoritária de vegetação terrestre (56% e 52%, respectivamente). Essas microbacias apresentaram áreas 43% e 45% de áreas ocupadas pela classe “área urbana”.

Figura 20 –Área ocupada em km² por cada classe de uso e cobertura da terra, e segundo as microbacias pertencentes ao Corpo Central I da represa Billings.



Fonte: Elaborado pela autora.

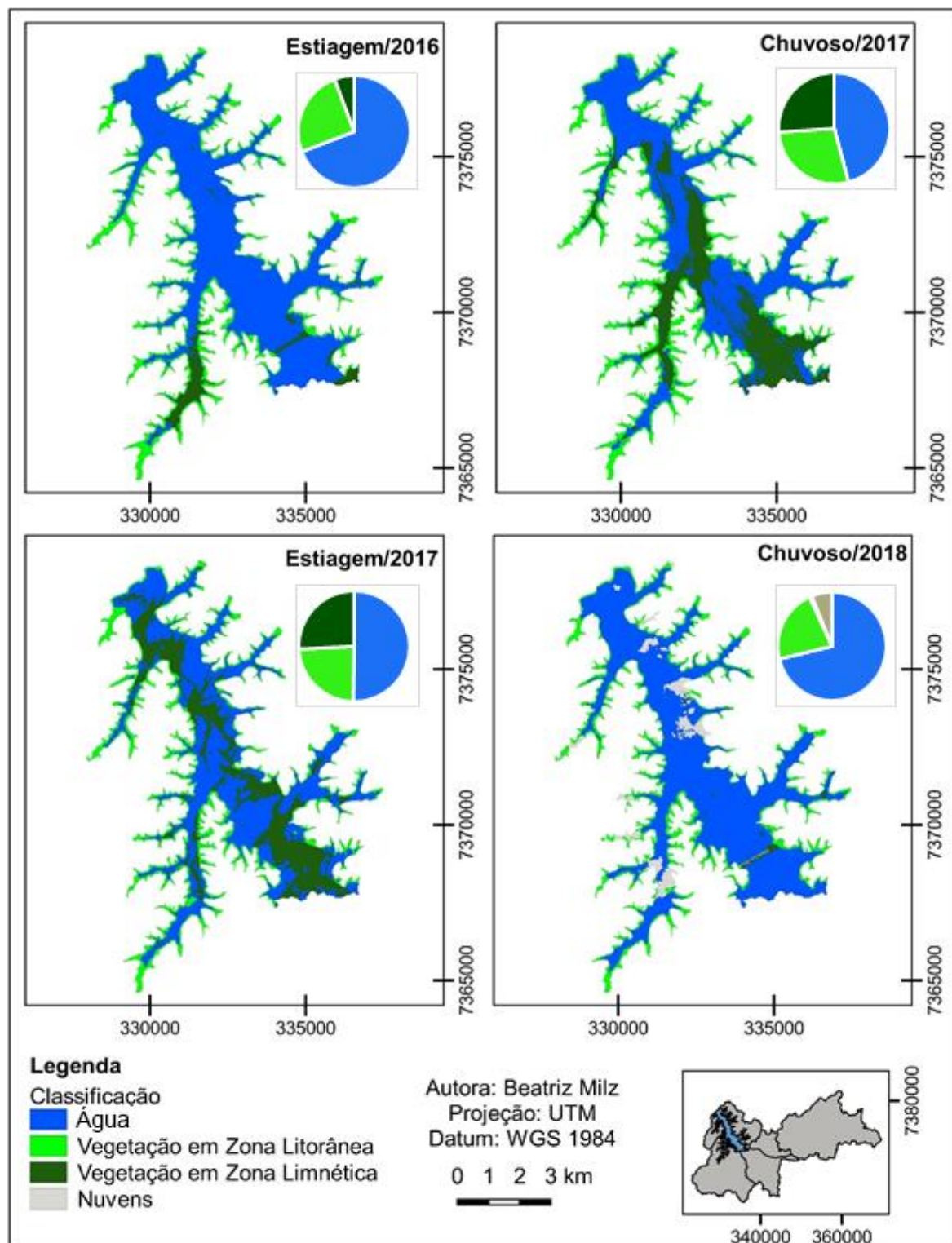
6.3.3 Classificação do corpo hídrico

A classificação do corpo hídrico (Tabela 14), resultou em quatro mapas referentes aos períodos estudados, apresentados na Figura 21. A área ocupada em cada classe, segundo o período, está representada na Figura 22.

Avaliando os resultados obtidos na classificação do corpo hídrico, nos períodos de estiagem/2017 e chuvoso/2017 ocorreu uma maior presença de vegetação em zona limnética no reservatório ao ser comparado com os outros períodos. Nestes dois períodos a vegetação em zona limnética ocupou cerca de 26% da área estudada. No período chuvoso/2018, a presença de vegetação em zona limnética foi próxima à 0% da área ocupada.

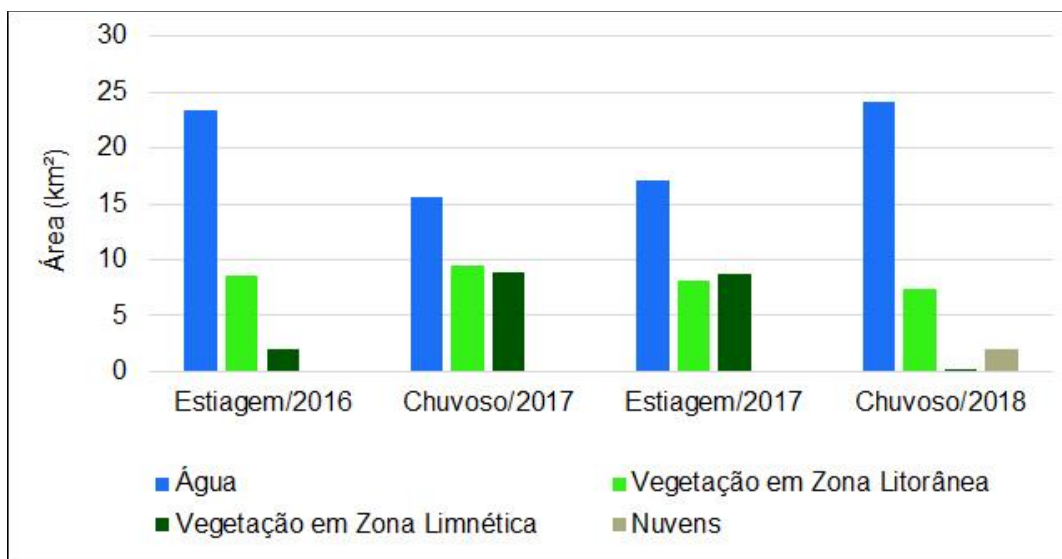
A vegetação acumulada na porção litorânea do reservatório considerada neste estudo como a classe de “vegetação em zona litorânea”, apresentou uma baixa variação entre os períodos estudados, sendo a maior área ocupada no período chuvoso/2017 (28%) e a menor no período chuvoso/2018 (22%).

Figura 21 - Mapa da classificação do corpo hídrico, referente ao Corpo Central I da represa Billings, no período de estiagem/2016 ao período chuvoso de 2018.



Fonte: Elaborado pela autora utilizando o *Software QGIS*, dados do projeto Topodata do INPE (2009), USGS (2016), Congedo (2016).

Figura 22 - Área, em km², ocupada por cada classe, referente à classificação do corpo hídrico no Corpo Central I da represa Billings.



Fonte: Elaborado pela autora.

6.3.4 Integração de dados espaciais e parâmetros de qualidade da água

A cobertura da terra na área de estudo é predominantemente ocupada por áreas urbanas, porém alguns pontos são influenciados por microbacias com áreas expressivas de vegetação terrestre.

Considerando que a direção preferencial das águas do Corpo Central I é no sentido à Barragem Rio das Pedras, ao relacionar os locais de coleta, a delimitação das microbacias (Capítulo I) e seu respectivo uso e cobertura da terra, é possível verificar para cada ponto de coleta quais microbacias estão mais próximas e que tem maiores chances de serem influenciados pelos usos da mesma.

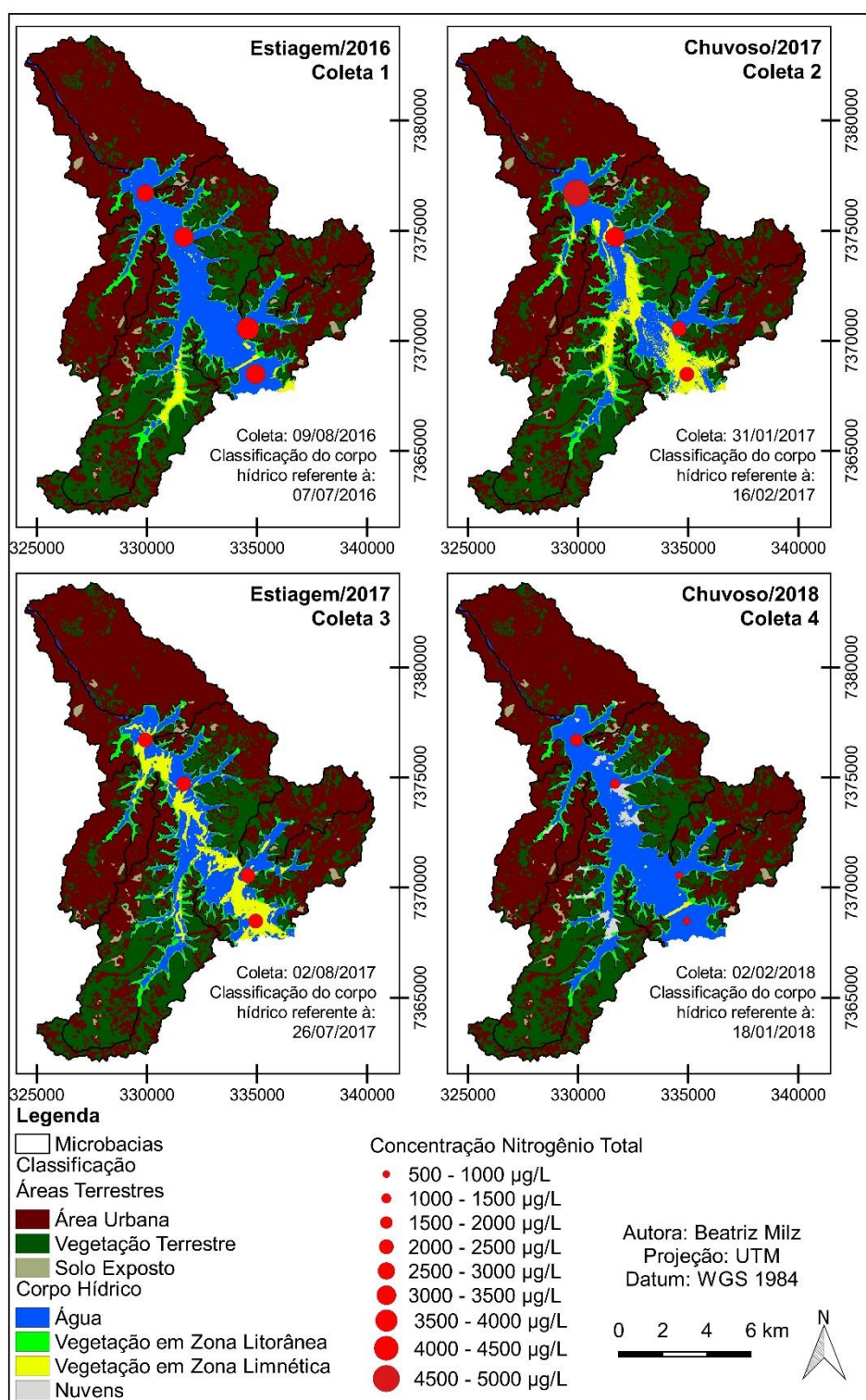
Tabela 17 – Pontos de coleta de amostras de água e microbacias sob a qual é influenciado, e o respectivo uso e cobertura da terra predominante.

Pontos de coleta	Microbacias de influência	Uso e cobertura da terra predominante
1	1 e 2	Áreas urbanas (92%)
2	3, 4, 5 e 6	Áreas urbanas (54%)
3 e 4	7 e 8	Áreas urbanas (66%)

Fonte: Elaborado pela autora.

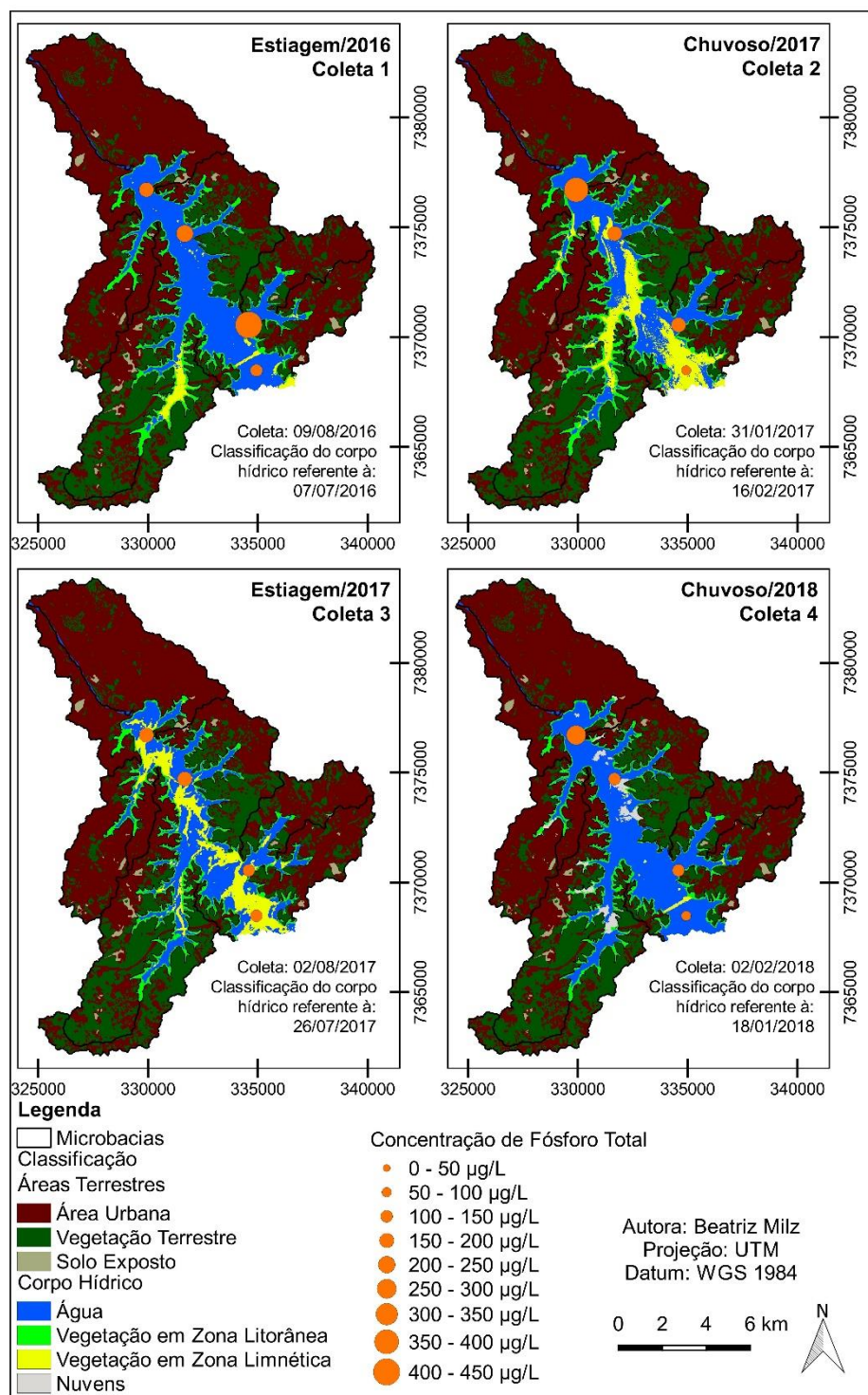
A estatística de Análise Interação Espaço Tempo (STI) univariada (LEGENDRE *et al.*, 2010) realizada no Capítulo I resultou em diferenças significativas espaciais para as variáveis Nitrito ($R^2_{\text{ajustado}} = 0,36$) e Nitrogênio Amoniacal ($R^2_{\text{ajustado}} = 0,38$). As concentrações obtidas para os nutrientes estão representadas nas seguintes figuras: Nitrogênio total - Figura 23; Fósforo total - Figura 24; Clorofila-a - Figura 25; Nitrito - Figura 26; e Nitrogênio Amoniacal - Figura 27.

Figura 23 – Mapa da classificação de uso e cobertura da terra na microbacia que compreende o Corpo Central I da APRM-Billings com adição das concentrações de Nitrogênio Total obtidas nos quatro períodos de coleta.



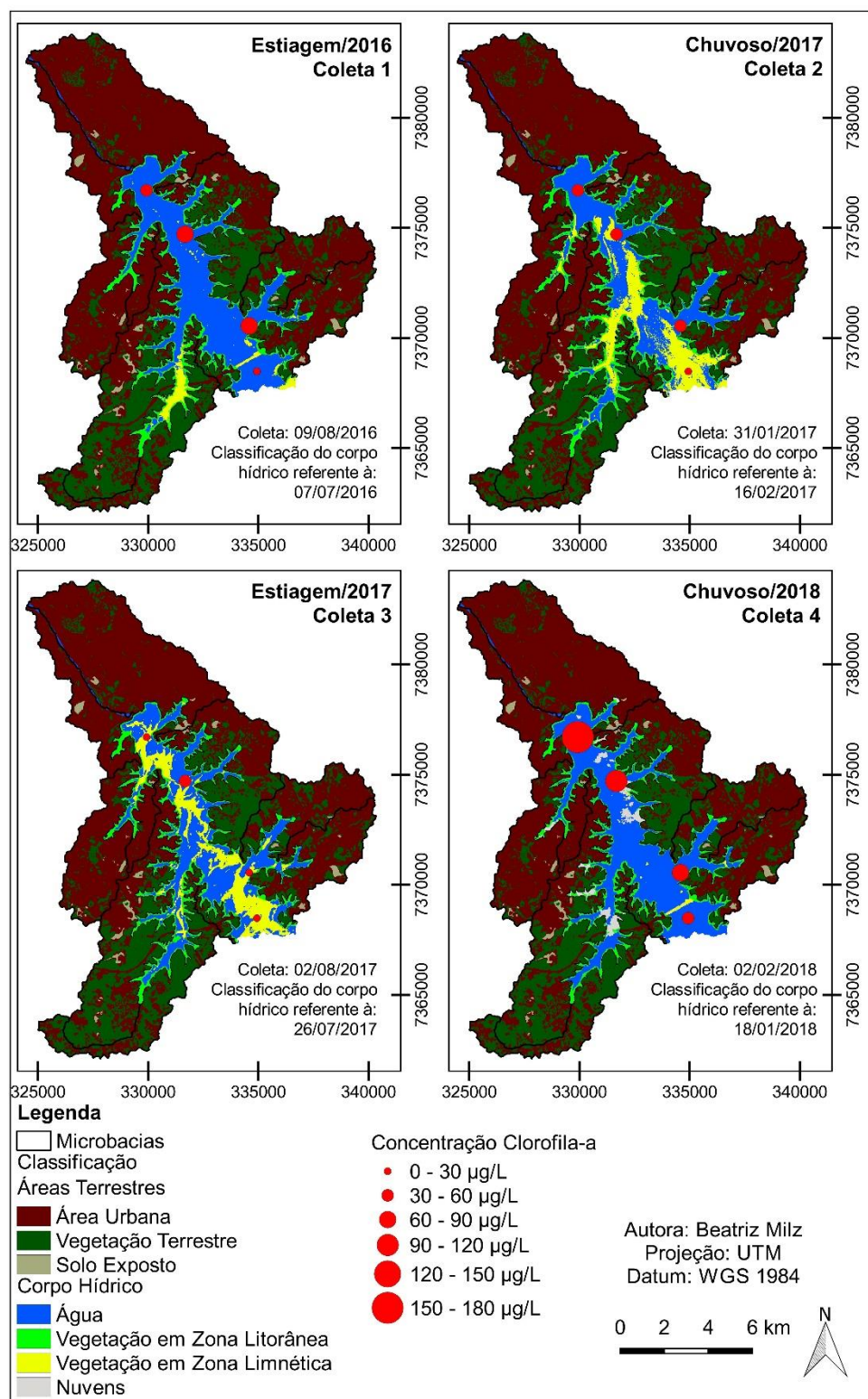
Fonte: Elaborado pela autora utilizando o Software QGIS, dados do projeto Topodata do INPE (2009), USGS (2016), Congedo (2016).

Figura 24 - Mapa da classificação de uso e cobertura da terra na microbacia que compreende o Corpo Central I da APRM-Billings com adição das concentrações de Fósforo Total obtidas nos quatro períodos de coleta.



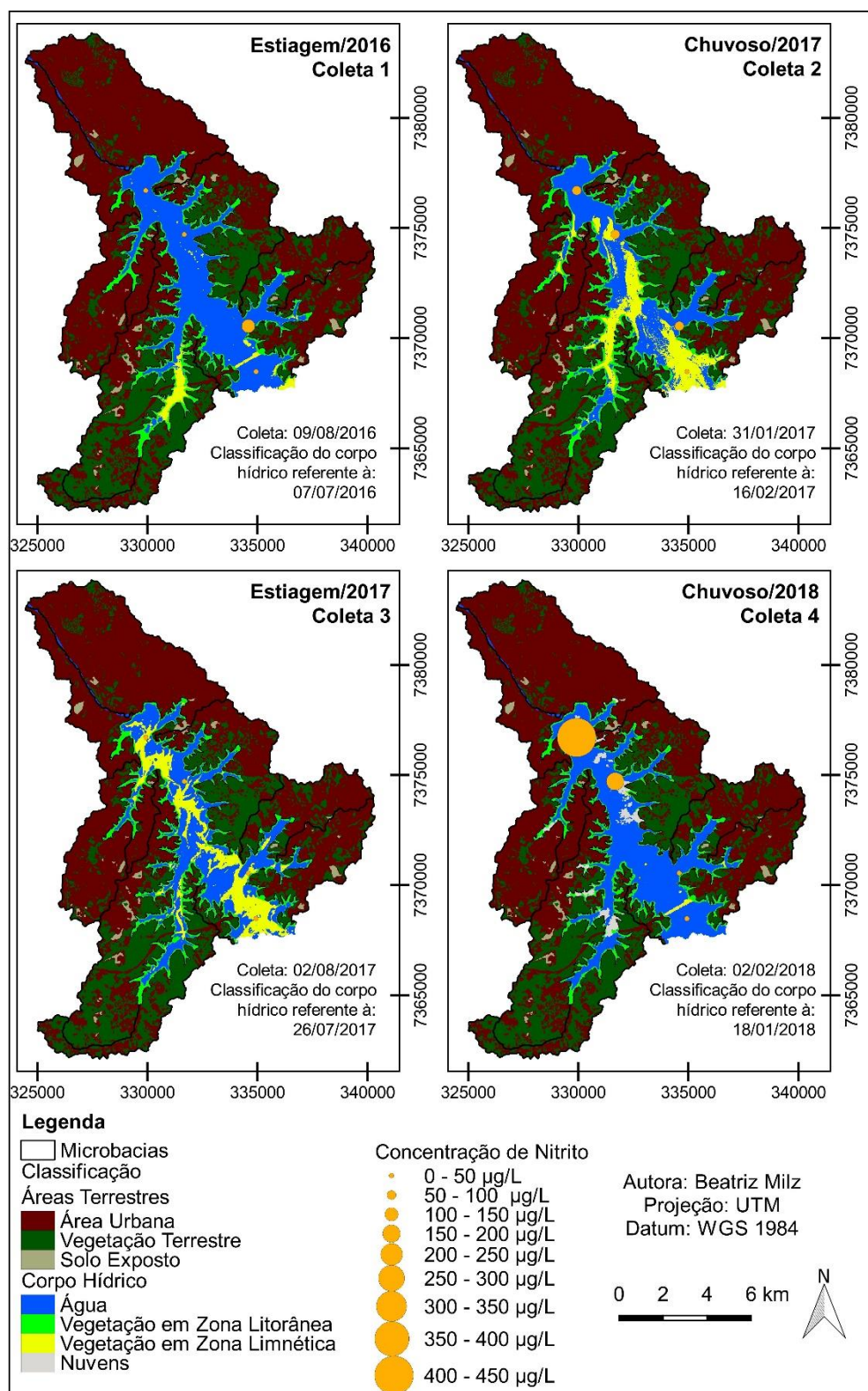
Fonte: Elaborado pela autora utilizando o Software QGIS, dados do projeto Topodata do INPE (2009), USGS (2016), Congedo (2016).

Figura 25 – Mapa da classificação de uso e cobertura da terra na microbacia que compreende o Corpo Central I da APRM-Billings com adição das concentrações de Clorofila-a obtidas nos quatro períodos de coleta.



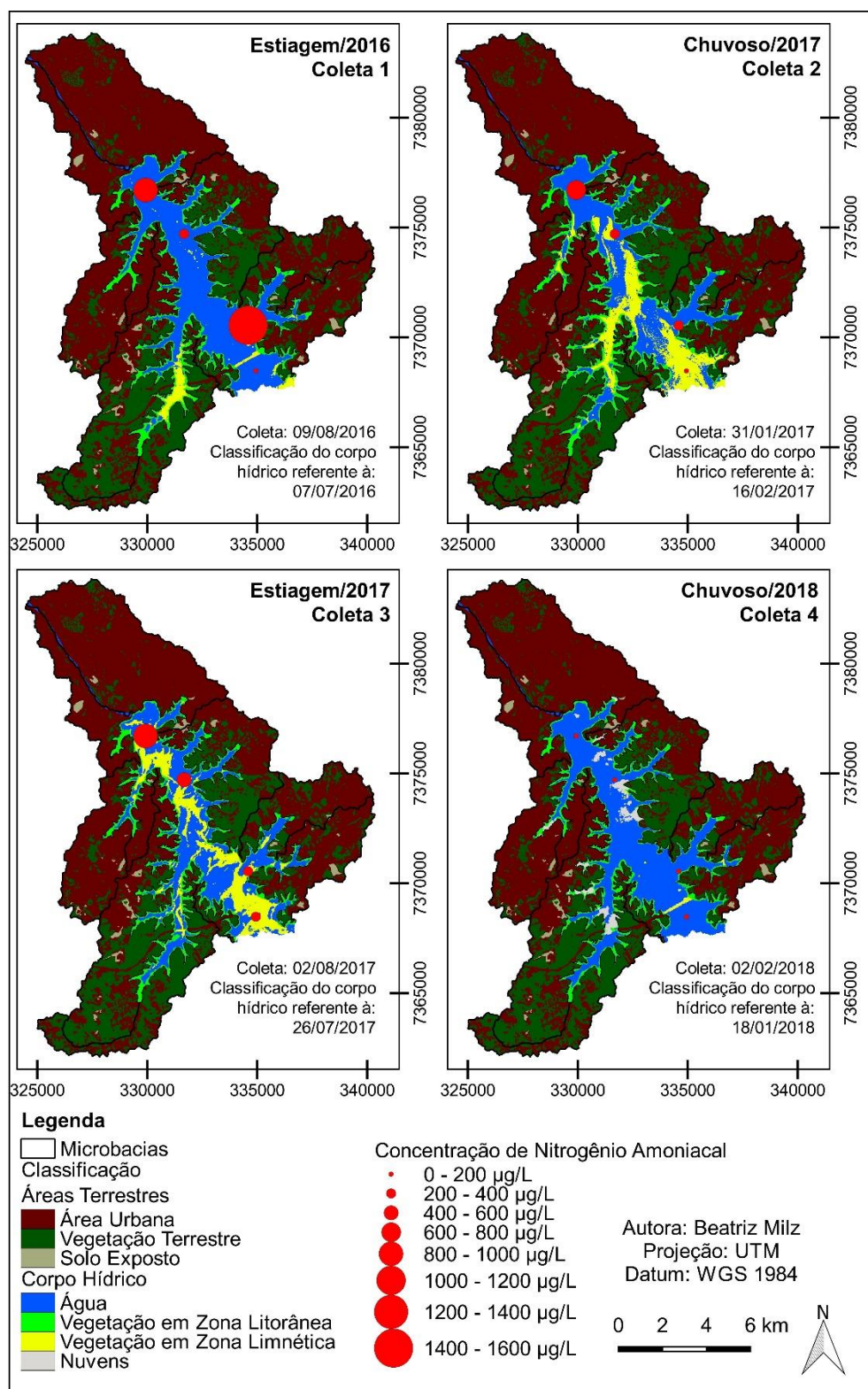
Fonte: Elaborado pela autora utilizando o *Software QGIS*, dados do projeto Topodata do INPE (2009), USGS (2016), Congedo (2016).

Figura 26 – Mapa da classificação de uso e cobertura da terra na microbacia que compreende o Corpo Central I da APRM-Billings com adição das concentrações de Nitrito obtidas nos quatro períodos de coleta.



Fonte: Elaborado pela autora utilizando o Software QGIS, dados do projeto Topodata do INPE (2009), USGS (2016), Congedo (2016).

Figura 27 – Mapa da classificação de uso e cobertura da terra na microbacia que compreende o Corpo Central I da APRM-Billings com adição das concentrações de Nitrogênio Amoniacal obtidas nos quatro períodos de coleta.



Fonte: Elaborado pela autora utilizando o *Software QGIS*, dados do projeto Topodata do INPE (2009), USGS (2016), Congedo (2016).

6.4 Discussão

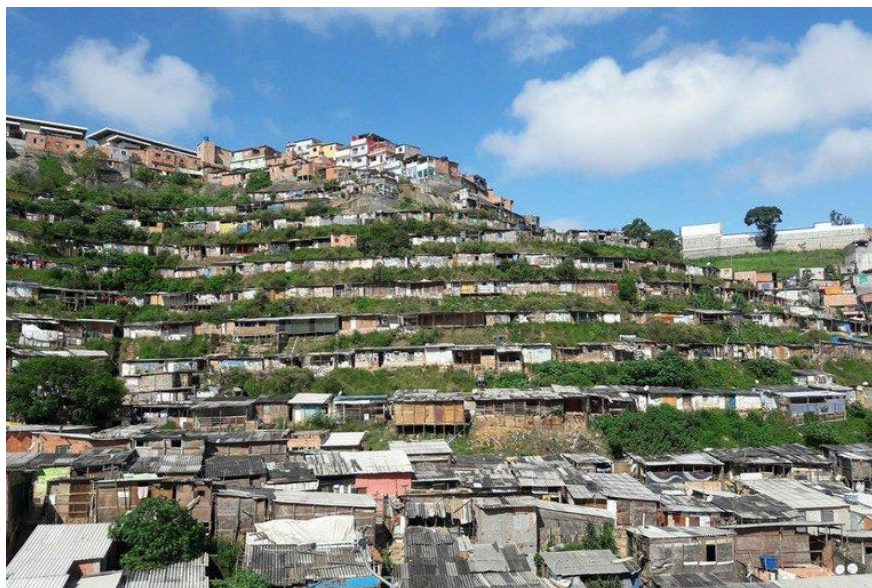
A área estudada é uma área de manancial pertencente à Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e a maior parte de sua área é ocupada pela classe de área urbana. Isso corrobora com a SMA (2010), que aponta que o Corpo Central I apresenta uma acentuada presença de áreas urbanas consolidadas. É importante ressaltar que parte significativa da RMSP “tem o solo impermeabilizado pela ocupação humana e as áreas de mananciais deterioradas pelo desmatamento e pela degradação ambiental generalizada” (JACOBI, CIBIM, SOUZA, 2015, p. 428).

Entretanto, ao considerar a classificação segundo as diferentes microbacias, existem variações na cobertura do uso da terra. As microbacias com as maiores porcentagens de área ocupada pela classe “área urbana” (85% - 93%) pertencem exclusivamente ao município de São Paulo, sendo o maior da RMSP e que historicamente sofreu uma ocupação urbana intensiva e irregular em áreas de mananciais (JACOBI, FRACALANZA & SILVA-SÁNCHEZ, 2015). As microbacias com as maiores porcentagens de área ocupada pela classe “vegetação terrestre” (52% - 56%) pertencem aos municípios de São Paulo, Diadema e São Bernardo do Campo.

Considerando que a área estudada é de manancial, seria importante considerar os serviços de coleta e tratamento de esgotos na região, para avaliar se eles estão atingindo o reservatório. Segundo Carmo e Tagnin (2001), grande parte dos esgotos produzidos na bacia do reservatório Billings é despejada sem tratamento diretamente na represa, devido à deficiência de serviços básicos de infra-estrutura, o que compromete a qualidade da água. Outros estudos realizados relacionando o uso e cobertura da terra e a qualidade de águas de reservatórios apontaram o despejo de esgoto doméstico sem tratamento como uma das principais fontes de impactos na qualidade das águas (PIASENTIN *et al.*, 2009; MENEZES *et al.*, 2016).

Na bacia hidrográfica do Corpo Central I observa-se ocupações urbanas irregulares em áreas próximas ao reservatório, como por exemplo a ocupação conhecida por Morro dos Macacos, no município de São Paulo, próximo ao Córrego Grota Funda, mostrada pela Figura 28.

Figura 28 – Ocupação irregular conhecida como “Morro dos Macacos”, município de São Paulo.



Fonte: Carta Capital (2018).

O ponto 1 de coleta é localizado em uma região que tem as duas microbacias hidrográficas com maior predominância de cobertura da classe área urbana e é próximo à Usina Elevatória de Pedreira, o que refletiu em altas concentrações de NT, PT e Chl-a, principalmente nos períodos chuvosos (Figura 23, Figura 24 e Figura 25). Este ponto também apresentou maiores concentrações de nitrogênio amoniacal nas coletas 1 à 3 (Figura 27), comparado aos outros pontos. Segundo a CETESB (2017), altas concentrações deste nutriente indicam a existência de uma fonte de poluição próximo ao local de coleta. No período chuvoso, o bombeamento das águas dos rios Pinheiros e Tietê para a represa Billings é intensificado para controle de cheias na cidade de São Paulo, o qual é legalizado através Resolução SMA-SSE-02/2010. O ponto 1 está localizado próximo à entrada do bombeamento do rio Pinheiros para a Represa, e provavelmente constitui-se na principal fonte de poluição e degradação da qualidade das águas deste ponto.

O ponto 2 está sob influência direta de microbacias onde a cobertura predominante é a da classe área urbana, porém apresenta expressivas áreas de vegetação terrestre. A região onde este ponto está localizado recebe esgoto não tratado através do Córrego Grota Funda. Esta contribuição interfere na qualidade das águas dessa parcela do reservatório, o que pode ser verificado através dos resultados

obtidos neste estudo e em outros realizados neste braço por Moutinho (2016), Reis (2016) e Lazzaro (2016).

No ponto 2, durante os períodos de estiagem é possível verificar concentrações de nutrientes próximas e em algumas amostras superiores ao encontrado no ponto 1, como o nitrogênio total, fósforo total e nitrito. A clorofila-a (Figura 25) também apresentou neste ponto concentrações superiores as encontradas no ponto 1 no período de estiagem, ou seja, presença de altas concentrações do fitoplâncton em consequência da entrada de elevada concentração de nutrientes via esgotos do Córrego Grotta Funda. Portanto, neste ponto é evidenciado a influência direta da degradação proveniente da entrada de esgotos sem tratamento nessa porção do reservatório, no período de estiagem.

Os pontos 3 e 4 estão sob maior influência de microbacias com predominância também de cobertura da classe de áreas urbanas (66%). Assim como o ponto 2, o ponto 3 recebe esgotos sem tratamento que atingem o reservatório através de vários córregos. Essa fonte de poluição ficou evidente principalmente nas concentrações superiores obtidas na Coleta 1 para nitrogênio total, nitrito, nitrogênio amoniacal, fósforo total e clorofila-a.

O ponto 4 é o ponto mais distante da Usina Elevatória de Pedreira, e representa a qualidade das águas do Corpo Central I mais próxima aos outros compartimentos ambientais do reservatório, como o braço Taquacetuba. Neste braço, as águas da Billings são bombeadas para o reservatório Guarapiranga, as quais são utilizadas para abastecimento público. Apesar deste ponto ser o que apresenta concentrações menores de nutrientes e clorofila-a comparada aos demais pontos amostrados (como nitrito, nitrogênio amoniacal e fósforo total), o que pode ser constatado pelos mapas apresentados. Porém ele também foi classificado pelo Índice de Estado Trófico (CUNHA *et al.*, 2013b) como hipereutrófico, indicando que a ocupação urbana intensa das microbacias está contribuindo para a degradação da qualidade das águas do Corpo Central I.

A influência do uso e cobertura da terra das microbacias na qualidade das águas do Corpo Central I é mais evidenciada durante os períodos de estiagem, principalmente a partir das concentrações de nutrientes obtidas nos pontos 2 e 3. É possível inferir que a entrada de esgotos sem tratamento no reservatório via diferentes tributários devido a intensa ocupação urbana contribui como fonte de poluição e

degradação de suas águas. Por outro lado, durante os períodos chuvosos, observou-se as maiores concentrações de nutrientes no ponto 1, claramente visualizadas pela de diminuição gradativa de concentração destes, a partir do distanciamento da Usina Elevatória de Pedreira. Deste modo, nos períodos chuvosos, é possível inferir que no ponto 1 o aporte de poluição revertida pela Usina Elevatória de Pedreira contribui mais fortemente do que as entradas de esgoto sem tratamento derivado da ocupação da terra nas microbacias.

Com relação à área ocupada por vegetação na zona limnética do reservatório (Figura 21), os dois períodos estudados no ano de 2017 (chuvoso e estiagem) apresentaram uma extensa área ocupada. Por outro lado, os períodos de estiagem de 2016 e chuvoso de 2018 apresentaram áreas pequenas ocupadas por essa vegetação. Portanto, considerando os quatro períodos avaliados, não houve evidências da existência de uma relação entre a sazonalidade (períodos de chuva e estiagem) e o padrão de distribuição e extensão de área ocupada pela vegetação aquática em zona limnética.

É importante ressaltar que o volume precipitado acumulado para o mês referente à coleta de período chuvoso de 2017 foi superior à precipitação mensal histórica para este mês. A alta precipitação provavelmente influenciou a entrada de maiores concentrações de nitrogênio e fósforo total no reservatório, determinadas no ponto 1. Essa alta disponibilidade de nutrientes mostra parece ser responsável ocupação de 26% do espelho d'água pela classe de vegetação em zona limnética nesta região. Como as florações de fitoplâncton e de macrófitas conjuntamente refletem o processo de eutrofização, este fato pode ser observado nos mapas apresentados.

Os mapas mostraram áreas no Corpo Central I ocupadas pela classe da vegetação em zona limnética, que variaram em extensão durante as coletas realizadas. Essa classe representa a presença de florações de fitoplâncton e/ou de macrófitas, porém com a metodologia utilizada não foi possível diferencia-las através do mapeamento. Na coleta 3 (período de estiagem/2017), observou-se a maior extensão de cobertura da vegetação em zona limnética, e as concentrações de clorofila-a foram menores do que o obtido nas outras coletas, indicando menor concentração de biomassa fitoplanctônica. Por outro lado, nesta coleta foram verificadas visualmente em campo extensas áreas cobertas por macrófitas flutuantes,

representadas na Figura 29. Baseado nas evidências visuais apontadas consideramos a possibilidade de que essas áreas eram constituídas predominantemente de macrófitas flutuantes.

Lima *et al.* (2017) estudaram a vegetação aquática no Açude Muquem (CE) utilizando imagens do LANDSAT-8, e os autores concluíram que 37% do reservatório estava coberto por plantas aquáticas em julho de 2014, e 30% em setembro de 2014. Ou seja, ocorreu uma diminuição de 7% na área ocupada no reservatório por plantas aquáticas em um período de apenas dois meses. O estudo de Lima *et al.* (2017) concluiu que houve uma maior presença de vegetação aquática no final do período chuvoso, diferente do resultado obtido neste estudo, onde não foi encontrado evidências de uma influência do período sazonal na presença de vegetação aquático no Corpo Central I.

Figura 29 – Macrófitas flutuantes na superfície das águas do Corpo Central I da represa Billings, 02/08/2017.



Fonte: Acervo do Laboratório de Ecofisiologia e Monitoramento Ambiental (UNIFESP-Diadema).

A vegetação acumulada na porção litorânea do reservatório, considerado neste estudo como a classe de vegetação em zona litorânea, apresentou uma baixa variação entre os períodos estudados. Portanto, nos períodos estudados, a vegetação que ocupa a região litorânea não apresentou diferenças quanto à área ocupada em relação à sazonalidade. Cabe ressaltar que a vegetação em zona litorânea ocupou uma parcela significativa do espelho de água durante todos os períodos amostrados.

Guasseli e Marques (2006) estudaram o padrão de distribuição e locais de acumulação de macrófitas aquáticas no Banhado do Taim – RS e encontraram um padrão recorrente de distribuição que se manteve mesmo após períodos de seca ou chuva prolongados. Entretanto, para que essa conclusão fosse possível, os pesquisadores analisaram 21 imagens referentes aos anos de 1973 – 2005. Em estudo de Lobo *et al.* (2017), foi avaliado a distribuição de florações de fitoplâncton no Rio Tapajós, durante o período de 1993 a 2016 e o padrão encontrado foi de distribuição regular de florações na região da margem esquerda do rio Tapajós.

Os trabalhos citados utilizaram uma análise histórica para estudar a distribuição de macrófitas e fitoplâncton em corpos hídricos. Neste trabalho foi considerado quatro datas em um período de dois anos, e para o período estudado não apresentou evidências de um padrão sazonal nítido de presença de vegetação aquática no Corpo Central I. Portanto, é importante que em estudos futuros sobre a vegetação aquática da represa Billings sejam considerados estudos de séries históricas e coletas com maior frequência para confirmar ou não a existência de um padrão e a variação entre os compartimentos ambientais do reservatório. Contudo, este trabalho mostrou a presença marcante da vegetação aquática tanto na zona limnética, quanto na litorânea, evidenciando através delas o impacto da perda qualidade das águas da represa, confirmado pela hipertrofia calculada.

6.5 Conclusões

Baseado nos resultados obtidos neste capítulo foi possível constatar as seguintes conclusões:

- O uso e cobertura da terra nas microbacias hidrográficas à qual o compartimento ambiental Corpo Central I faz parte, em sua totalidade apresenta uma ocupação predominante de áreas urbanas. As microbacias com maiores taxas de ocupação urbana pertencem ao município de São Paulo;
- No ano de 2017, nos dois períodos estudados (chuvoso e estiagem), houve uma maior presença de vegetação aquática em zona limnética no reservatório, diferente do observado nos outros períodos;

- Considerando os períodos estudados, a sazonalidade (períodos de chuva e estiagem) não evidenciou uma influência sazonal para padrão de variação de presença de vegetação aquática em zona limnética na represa.
- Considerando os períodos estudados, não houve evidências de que a sazonalidade (períodos de chuva e estiagem) influencia no padrão de ocupação de vegetação aquática em zona limnética na represa;
- Nos períodos de estiagem, o aporte de nutrientes por esgotos não tratados via tributários parece ser o fator que mais influenciou os parâmetros de qualidade da água determinados nesse estudo;
- O aporte de poluição revertida pela Usina Elevatória de Pedreira, durante os períodos chuvosos, apresentou evidências de que influencia mais fortemente as elevadas concentrações de nutrientes, principalmente na região contemplada pelo ponto 1.

7 Conclusões gerais e perspectivas futuras

Conclusões

A avaliação realizada da qualidade das águas do Corpo Central I da represa Billings e de características de uso e cobertura da terra na microbacia hidrográfica teve como principais resultados:

- A aplicação do Índice do Estado Trófico permitiu caracterizar o Compartimento Ambiental Corpo Central I como hipereutrófico;
- A hipótese de que a variação sazonal implica em alterações significativas nas variáveis físicas, químicas e biológicas das águas do Corpo Central I foi corroborada;
- Considerando a maioria dos parâmetros ambientais estudados, não ocorre uma alteração significativa na qualidade das águas do Corpo Central I entre os pontos de coleta;
- O estudo do uso e cobertura da terra nas microbacias hidrográficas à qual o compartimento ambiental Corpo Central I faz parte, revelou uma ocupação predominante de áreas urbanas;
- A reversão do rio Pinheiros, através da Usina Elevatória de Pedreira, é o principal fator determinante na degradação da qualidade das águas superficiais do Corpo Central I.

Perspectivas futuras

É importante que os estudos no reservatório Billings sejam contínuos, considerando a relevância deste reservatório para o abastecimento público da Região Metropolitana de São Paulo e seu atual estado de eutrofização.

A fim de aprofundar os conhecimentos sobre a qualidade das águas do reservatório, é importante que em pesquisas futuras as seguintes questões sejam contempladas:

- Utilização da ferramenta SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) a fim de investigar os impactos da mudança no uso da terra no reservatório;
- Estudo do sedimento do reservatório, a fim de avaliar a presença de possíveis poluentes, e se é uma fonte de fósforo para as águas;

- Monitoramento da reversão das águas dos rios Pinheiros e Tietê, que ocorre na Usina Elevatória de Pedreira, utilizando dados mais precisos em termos de frequência (ao menos mensal) e volume bombeado;
- Obtenção de dados georreferenciados da rede de saneamento, a fim de avaliar quais são as regiões que não são atendidas pela coleta e tratamento de esgotos, e consequentemente são fontes de poluição para o reservatório;
- Realização de uma análise espacial histórica para o estudo da vegetação aquática presente no reservatório em conjunto com técnicas de sensoriamento remoto, a fim de diferenciar as florações de fitoplâncton e de macrófitas nas imagens de satélite.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Portal da Qualidade das Águas**: Avaliação de Qualidade - Introdução. [201-]. Disponível em: <<http://portalpnqa.ana.gov.br/avaliacao.aspx>>. Acesso em: 20 mar. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **ATLAS Brasil**: Abastecimento Urbano de Água – Região Metropolitana de São Paulo. [201-]. Disponível em: <<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/analise/RegiaoMetropolitana.aspx?rme=24>>. Acesso em: 06 jun. 2018.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasil, 09 jan. 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/l9433.htm>. Acesso em: jan. 2017.

CALIJURI, M. C.; DEBERDT, G. L. B.; MINOTI, R. T.. A produtividade primária pelo fitoplâncton na Represa de Salto Alto (Americana-SP). In: HENRY, R. (Ed.). **Ecologia de reservatórios**: estrutura, função e aspectos sociais. Botucatu: FUNDIBIO, 2007. p. 109-148.

CAPOBIANCO, João Paulo Ribeiro; WHATELY, Marussia. **Billings 2000 : ameaças e perspectivas para o maior reservatório de água da região metropolitana de São Paulo** : relatório do diagnóstico socioambiental participativo da bacia hidrográfica da Billings no período 1989-99 / São Paulo : Instituto Socioambiental, 2002. Disponível em: <http://siteantigo.socioambiental.org/banco_imagens/pdfs/56.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2016.

CARDOSO-SILVA, S.; NISHIMURA, P. Y.; PADIAL, P. R.; MARIANI, C. F.; MOSCHINI-CARLOS, V. & POMPEO, M., 2014. **Compartimentalização e qualidade da água: o caso da Represa Billings**. *Bioikos*, 28(1): 31-43.

CARTA CAPITAL. **Morro dos Macacos**: Cerca de 2 mil famílias podem ser desalojadas na Cidade Ademar. 2018. Disponível em: <<https://www.cartacapital.com.br/blogs/32xsp/2-000-familias-poderao-ser-desalojadas-de-favela-na-cidade-ademar>>. Acesso em: 28 mar. 2018.

CASALI, Simone Pereira. **A comunidade fitoplanctônica no reservatório de Itupararanga (Bacia do Rio Sorocaba, SP)**. 2014. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. doi:10.11606/T.18.2014.tde-25092014-152955. Acesso em: abr. 2018.

CETESB. **Determinação de Clorofila-a e Feofitina-a: método espectrofotométrico**. Norma Técnica L5.306/2014. 3ª Edição. 14 pg. 2014. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/11/2013/11/L5306.pdf>>. Acesso em: 01 abr. 2016.

CETESB. **Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo 2016**. São Paulo, 2017. 287 p. ISBN 978-85-9467-018-2 Disponível em: <<http://aguasinteriores.cetesb.sp.gov.br/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em: set. 2017.

CETESB. **Enquadramento dos Corpos Hídricos: Mapas Temáticos**. 2016. Disponível em: <<http://aguasinteriores.cetesb.sp.gov.br/enquadramento-dos-corpos-hidricos-mapas-tematicos/>>. Acesso em: set. 2017.

CETESB (São Paulo). **Manual de cianobactérias planctônicas: legislação, orientações para o monitoramento e aspectos ambientais**. São Paulo: CETESB, 2013. 47 p. Disponível em: <<http://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2015/01/manual-cianobacterias-2013.pdf>>. Acesso em: 08 mar. 2018.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução n. 357, de 17 de mar. de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, DF, 2005. 27 p. Publicada no DOU nº 053, de 18/03/2005, págs. 58-63 Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em 01 de março de 2016.

CONGEDO, Luca. **Semi-Automatic Classification Plugin Documentation**. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1>.

CORTEZ, M. P. T.. **Aspectos ecológicos e sua relação com o polimorfismo genético e taxonomia convencional de cianobactérias da Represa Billings**. 2013. 69 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

CUNHA, D. G. F.; CALIJURI, M. do C. Variação sazonal dos grupos funcionais fitoplanctônicos em braços de um reservatório tropical de usos múltiplos no estado de São Paulo (Brasil). **Acta Botanica Brasilica**, v. 25, n. 4, p. 822–831, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-33062011000400009&lng=pt&tlng=pt>.

CUNHA, Davi Gasparini Fernandes *et al.* Resolução CONAMA 357/2005: análise espacial e temporal de não conformidades em rios e reservatórios do estado de São Paulo de acordo com seus enquadramentos (2005-2009). **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p. 159-168, June 2013a. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522013000200008&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: mar. 2018.

CUNHA, Davi Gasparini Fernandes; CALIJURI, Maria do Carmo; LAMPARELLI, Marta Condé. A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSItsr). **Ecological Engineering**, [s.l.], v. 60, p.126-134, nov. 2013b. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.058>.

DATAGEO SP. **Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do Estado de São Paulo**. Disponível em: <<http://datageo.ambiente.sp.gov.br/>>. Acesso em: 01 out. 2016.

EMAE. **Elevatórias**. 2011. Disponível em: <<http://emae.com.br/conteudo.asp?id=Elevatórias>>. Acesso em: ago. 2017.

EMAE – Empresa Metropolitana de Águas e Energia. [Carta]. 10 jan. 2018. São Paulo [para] NORDI, Cristina Souza Freire Nordi. 2 f. Assunto: Fornecimento de Dados do Reservatório Billings para Dissertação de Mestrado da UNIFESP – CT/G/4989/2018.

EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANA S/A (EMPLASA). **Região Metropolitana de São Paulo: Sobre a RMSP**. 2018. Disponível em: <<https://www.emplasa.sp.gov.br/RMSP>>. Acesso em: mar. 2018.

ESTEVES, F. A., 2011. **Fundamentos de limnologia**. 3 ed.. Rio de Janeiro: Editora Interciência. 790p.

FIGUEIREDO, Divino. **Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto**. 2005. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm.pdf>. Acesso em: set. 2016.

FLORENZANO, Teresa Gallotti. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. São Paulo: Oficina de textos, 2007.

FRACALANZA, Ana Paula; SINISGALLI; Paulo Antonio de Almeida. **Conflitos de uso da água do reservatório Billings**. Atores e processos na governança da água no Estado de São Paulo. Organização de Pedro Roberto Jacobi. São Paulo: Annablume, 2009. Coleção Cidadania e Meio Ambiente. 174 p.

GEOSAMPA. **Mapa Digital da Cidade de São Paulo**. 2015. Disponível em: <http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/_SBC.aspx>. Acesso em: jul. 2017.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Resolução Conjunta SMA/SSE - 002 de 19 de Fevereiro de 2010**. Trata de procedimentos a serem adotados em casos de emergência na operação do sistema hídrico da bacia do Alto Tietê e bacias a ela interligadas. 2010. Publicada no D.O.E de 20-02-2010 SEÇÃO I PÁG 112. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/resolucao/2010/2010_res_est_sma_sse_conjunta_02.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2016.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **DECRETO Nº 10.755, DE 22 DE NOVEMBRO DE 1977**. Dispõe sobre o enquadramento dos corpos de água receptores na classificação prevista no Decreto nº 8.468, de 8 de setembro de 1976, e dá providências correlatas. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/arquivos/enquadramento/Dec_Est_10755.pdf>. Acesso em: ago. 2017.

GraphPad Prism 6 for Windows. Versão 6.01. Setembro, 2012. San Diego, California EUA. Disponível em: <<https://www.graphpad.com/scientific-software/prism/>>.

GRASS DEVELOPMENT TEAM. GRASS GIS 7.5.svn Reference Manual. 201-. Disponível em: <<https://grass.osgeo.org/grass75/manuals/index.html>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

GUASSELLI, L.A., MARQUES, D.M.M. Relação entre as estruturas de fundo e os padrões da cobertura de macrófitas aquáticas no Banhado do Taim – RS. In: **VI Simpósio Nacional de Geomorfologia /Regional Conference on Geomorphology**. Anais..., Goiânia-GO. 2006.

INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (IAG-USP). **Informações sobre as Estações do Ano na Cidade de São Paulo**. Disponível em: <<http://estacao.iag.usp.br/seasons/index.php>>. Acesso em: jun. 2016.

INSTITUTO DEMOCRACIA E SUSTENTABILIDADE (IDS); LABORATÓRIO DE GEOPROCESSAMENTO DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (LABGEO/POLI/USP). **Mananciais paulistas como prioridade da agenda pública: identificação de áreas críticas e proposta de zoneamento**. São Paulo, SP. 2017. 33 p. Disponível em: <http://ids-ecostage.s3.amazonaws.com/media/Mananciais_paulistas_-_Sum%C3%A1rio_Executivo_-_2017.pdf>. Acesso em: março. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **TOPODATA**: Banco de dados geomorfométricos do Brasil. 2009. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/dados.php>>. Acesso em: 12 out. 2017.

JACOBI, Pedro Roberto; FRACALANZA, Ana Paula; SILVA-SÁNCHEZ, Solange. Governança da água e inovação na política de recuperação de recursos hídricos na cidade de São Paulo. **Cadernos Metrópole**, [s.l.], v. 17, n. 33, p.61-81, maio 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/2236-9996.2015-3303>.

JACOBI, Pedro Roberto; CIBIM, Juliana Cassano; SOUZA, Alexandre Nascimento. Crise da água na região metropolitana de São Paulo – 2013/2015. **Geousp**: Espaço e Tempo (Online), [s.l.], v. 19, n. 3, p.422-444, 6 dez. 2015. Universidade de São Paulo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBiUSP. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/geousp/article/viewFile/104114/112860>>. Acesso em: nov. 2017.

KOROLEFF, F., 1976. *Determination of nutrients*. In: Grasshoff, K. (ed). **Methodsofseawateranalysis**. New York: VerlagChemieWeinheim. p. 125-131.

LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento**. São Paulo : USP/ Departamento de Ecologia., 2004. 235 f. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, 2004.

LANDIS, J.R. e KOCH, G.G. **The measurement of observer agreement for categorical data**. Biometrics, v.33, n.1, p. 159-174, 1977.

LAZZARO, Luiza Gonçalves. **Distribuição horizontal da concentração de nutrientes e clorofila-a em um braço da Represa Billings (São Paulo - Diadema/SP)**. 2017. 48 f. Trabalho de conclusão de curso - Curso de Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal de São Paulo - Campus Diadema, Diadema, 2017.

LEGENDRE, P., BORCARD, D., & DE CÁCERES, M. STI: Space-time ANOVA models without replications. 2012. R package version 1.0.2. Disponível em: <<http://vegmod.ctfc.cat/?cat=7>>

LEGENDRE, P., DE CÁCERES, M., & BORCARD, D. (2010). Community surveys through space and time: testing the space–time interaction in the absence of replication. Ecology, 91(1), 262–272. <http://doi.org/10.1890/09-0199.1>

LIMA, Francisco Josivan de Oliveira *et al.* Uso do Sensoriamento Remoto no Monitoramento de Plantas Aquáticas. **Conexões - Ciência e Tecnologia**, [s.l.], v. 11, n. 1, p.49-56, 1 mar. 2017. IFCE. Disponível em: <<http://conexoes.ifce.edu.br/index.php/conexoes/article/view/1077/0>>. Acesso em mar. 2018.

LIMA, Vitoria Fernandes de Melo. **Dinâmica do fitoplâncton e assimilação de nitrato, amônio e ureia em reservatórios subtropicais com diferentes graus de trofia**. 2015. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015. doi:10.11606/D.18.2016.tde-14082015-105749. Acesso em: mar. 2018.

LOBO, Felipe de Lucia *et al.* Estudo espaço-temporal de florações de cianobactérias no Rio Tapajós: Monitoramento por sensoriamento remoto e experimento em laboratório. **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto -sbsr**, Santos - Sp, Brasil, p.1368-1375, 2017. Disponível em: <<http://marte2.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/marte2/2017/10.23.19.35.43>>. Acesso em: mar. 2018.

MCDONALD, Robert I. et al. Estimating watershed degradation over the last century and its impact on water-treatment costs for the world's large cities. **Proceedings Of The National Academy Of Sciences**, [s.l.], v. 113, n. 32, p.9117-9122, 25 jul. 2016. Proceedings of the National Academy of Sciences. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1605354113>.

MACKERETH, F. J. H.; HERON, J. & TALLING, J. F., 1978. **Water chemistry: some revised methods for limnologists**. Fresh water Biological Association, Sci. Po. nº 36, 121p.

MELLO, ANA DE PAULA GONÇALVES; ALVES, GUSTAVO BENEDITO MEDEIROS; LOVERDE-OLIVEIRA, SIMONI MARIA. **Uso e cobertura vegetal da terra na bacia do rio Mutum nas Zonas de Transição Aquático-Terrestre do Pantanal Norte**.

Anais 6º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Cuiabá, MT, 22 a 26 de outubro 2016. Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p.172 -179. Disponível em: <<https://www.geopantanal.cnptia.embrapa.br/2016/cd/pdf/p111.pdf>>. Acesso em nov. 2017.

MENEZES, João Paulo Cunha *et al.* Relação entre padrões de uso e ocupação do solo e qualidade da água em uma bacia hidrográfica urbana. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s.l.], v. 21, n. 3, p.519-534, set. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016145405>.

MESQUITA, Eveline Andrade; CRUZ, Maria Lucia Brito da. O uso e cobertura da terra na sub-bacia hidrográfica do riacho do sangue-CE: elementos contributivos ao planejamento territorial. **Anais do Vi Congresso Iberoamericano de Estudios Territoriales y Ambientales**, São Paulo, p.2981-2997, set. 2014. Disponível em: <[http://6cieta.org/arquivos-anais/eixo5/Eveline Andrade Mesquita, Maria Lucia Brito da Cruz.pdf](http://6cieta.org/arquivos-anais/eixo5/Eveline%20Andrade%20Mesquita,%20Maria%20Lucia%20Brito%20da%20Cruz.pdf)>. Acesso em: jan. 2018.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Download de dados geográficos**. 2007. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>>. Acesso em: set. 2016.

MOUTINHO, F. H. M.; **O fitoplâncton como ferramenta para o monitoramento das águas no reservatório Billings (Diadema, SP)**. Dissertação de Mestrado - Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas, Universidade Federal de São Paulo – Campus Diadema. 135 p. Diadema, 2016.

NISHIMURA, P.Y.; MOSCHINI-CARLOS, V.; POMPÊO, M.L.M. **A Represa Billings e as captações de Água Bruta. (2010)**. II Congresso Estadual de Comitês de Bacias Hidrográficas, 2010, São Pedro. Disponível em: <http://ecologia.ib.usp.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=163&Itemid=462>. Acesso em jan 2018.

NISHIMURA, P.Y.; MOSCHINI-CARLOS, V.; POMPÊO, M.L.M. **A COMUNIDADE FITOPLANCTÔNICA COMO DISCRIMINADOR DA QUALIDADE DA ÁGUA NA REPRESA BILLINGS (SÃO PAULO, SP)**. Pompêo *et al.* (Orgs.) Ecologia de reservatórios e interfaces, São Paulo : Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, 2015. p. 49-58. Disponível em: <http://ecologia.ib.usp.br/reservatorios/PDF/Cap._3_Comunidade_fitoplanctonica.pdf> . Acesso em: maio 2018.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO. Biblioteca Unifesp Campus Diadema. Manual de normalização de trabalhos acadêmicos. Diadema, 2013. 54 p. Disponível em:<http://www.unifesp.br/home_diadema/biblioteca.html>. Acesso em: 26 jun. 2017.

OKSANEN, J., BLANCHET, F. G., FRIENDLY, M., KINDT, R., LEGENDRE, P., MCGLINN, D., MINCHIN, P. R., O'HARA, R. B., SIMPSON, G. L., SOLYMOS, P., STEVENS, M. H. M., SZOECS E., WAGNER, H. (2017). **vegan: Community Ecology Package**. R package version 2.4-3. Disponível em: <<http://CRAN.R-project.org/package=vegan>>

OGASHAWARA, Igor et al . **Cyanobacteria detection in Guarapiranga Reservoir (São Paulo State, Brazil) using Landsat TM and ETM+ images.** *Rev. Ambient. Água*, Taubaté , v. 9, n. 2, p. 224-238, June 2014 . Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1980-993X2014000200005&lng=en&nrm=iso>. access on 06 Sept. 2017. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1327>.

PALMER, Stephanie C.j.; KUTSER, Tiit; HUNTER, Peter D.. **Remote sensing of inland waters: Challenges, progress and future directions.** *Remote Sensing Of Environment*, [s.l.], v. 157, p.1-8, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.021>.

PARQUE DOS BÚFALOS. **Movimento em defesa do Parque dos Búfalos.** [201-]. Disponível em: <<http://www.parquedosbufalos.com/movimento-em-defesa-do-parque-dos-bufalos/>>. Acesso em: ago. 2017.

PIASENTIN, ADRIANA MIÓLLA *et al.* Índice de Qualidade da Água (IQA) do reservatório Tanque Grande, Guarulhos (SP): Análise sazonal e efeitos do uso e ocupação do solo. *Geociencias*, v. 28, n. 3, p. 305-317, 2009. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/71381>>.

PORTO, Monica F. A.; PORTO, Rubem La Laina. Gestão de bacias hidrográficas. **Estud. av.**, São Paulo , v. 22, n. 63, p. 43-60, 2008 . Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142008000200004&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em 15 mar. 2018.

R CORE TEAM (2015). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>

ROY, D.P.; *et al.* **Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research.** *Remote Sensing of Environment*. Elsevier. 5 Abr. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003442571400042X>>. Acesso em: 05 abr. 2016.

REIS, BRUNA ARAUJO. **Avaliação de parâmetros da qualidade da água em um braço da Represa Billings.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Ambientais) – Universidade Federal de São Paulo – Campus Diadema, 2017. 50f.

SABESP. **CHESS - Crise Hídrica, Estratégia e Soluções da Sabesp: Para a Região Metropolitana de São Paulo.** 30 abr. 2015. Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/crisehidrica/chess_crise_hidrica.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2016.

SABESP. **Notícias:** Da geração de energia elétrica ao abastecimento público: conheça a história do Sistema Rio Grande. 2017. Disponível em:

<<http://site.sabesp.com.br/site/imprensa/noticias-detalle.aspx?secaold=65&id=7465>>. Acesso em: jan. 2018.

SANCHES, Ieda Del'Arco; Andrade, Ricardo Guimarães; Quartaroli, Carlos Fernando; Rodrigues, Cristina Aparecida Gonçalves. **Análise comparativa de três métodos de correção atmosférica de imagens Landsat5–TM para obtenção de reflectância de superfície e NDVI**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR)., 2011, Curitiba. Anais... São José dos Campos: INPE, 2011. p. 7564-7571. ISBN 978-85-17-00056-0. Disponível em: <<https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/mapastore/download/PDF10.pdf>> Acesso em: nov. 2016.

SÃO PAULO. **Lei nº 13.579, de 13/07/2009**. Define a Área de Proteção e Recuperação dos Mananciais da Bacia Hidrográfica do Reservatório Billings - APRM-B. Diário Oficial do Estado de São Paulo, 14 jul. 2009, p. 1/7.

SCHINDLER, D. W.. Recent advances in the understanding and management of eutrophication. **Limnology And Oceanography**, [s.l.], v. 51, n. 12, p.356-363, jan. 2006. Wiley-Blackwell. http://dx.doi.org/10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0356.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE (SMA). **Cadernos de Educação Ambiental: Edição Especial Mananciais – Billings**. São Paulo, v. 1. 2010. 150 p. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/wpcontent/uploads/2011/10/mananciaisbillingsedicaoespecial2011.pdf>> . Acesso em 20 março de 2015.

SILVA, Ricardo Toledo; PORTO, Monica Ferreira do Amaral. Gestão urbana e gestão das águas: caminhos da integração. **Estudos Avançados**, [s.l.], v. 17, n. 47, p.129-145, abr. 2003. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-40142003000100007>.

SINHA, E.; MICHALAK, A. M.; BALAJI, V.. Eutrophication will increase during the 21st century as a result of precipitation changes. **Science**, [s.l.], v. 357, n. 6349, p.405-408, 27 jul. 2017. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.aan2409>.

SMITH, Val H. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems a global problem. **Environmental Science And Pollution Research**, [s.l.], v. 10, n. 2, p.126-139, mar. 2003. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1065/espr2002.12.142>.

SOBRINHO, Teodorico Alves; OLIVEIRA, Paulo T. S.; RODRIGUES, Dulce B. B.; AYRES, Fabio M. **Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM**. Eng. Agríc. 2010, vol.30, n.1, pp.46-57. ISSN 0100-6916. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/eagri/v30n1/a05v30n1>>. Acesso em: nov. 2017.

Software QGIS Desktop 2.18: Um Sistema de Informação Geográfica livre e aberto. Disponível em: <http://qgis.org/pt_BR/site/>. Acesso em: 10 mar. 2016.

SØNDERGAARD, Martin; BJERRING, Rikke; JEPPESEN, Erik. Persistent internal phosphorus loading during summer in shallow eutrophic lakes. **Hydrobiologia**, [s.l.], v. 710, n. 1, p.95-107, 5 abr. 2012. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-012-1091-3>.

SPRING. **Tutorial de Geoprocessamento SPRING**. 2006. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/classific.html>>. Acesso em: 22 jan. 2018.

STRICKLAND, J. D.; PARSONS, T. R.. **A manual of seawater analysis**: Bulletin n. 125. Nanaimo: Fisheries Research Board of Canada, 1960. 185 p.

TAGNIN, R.A. ; CARMO, R. L. **.Uso Múltiplo da água e Múltiplos Conflitos em Contextos Urbanos: o caso do Reservatório Billings**. In: Hogan DJ; Baeninger R; Cunha JMP; Carmo RL.. (Org.). Migração e Ambiente nas Aglomerações Urbanas. Campinas: UNICAMP, 2001, v. , p. 421-444. Disponível em: <http://www.nepo.unicamp.br/textos/publicacoes/livros/migracao_urbanas/02pronex_14_Uso_Multiplo.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2016.

TUCCI, Carlos E. M.; MENDES, Carlos André. **Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica**. Ministério do Meio Ambiente / SQA. – Brasília: MMA, 2006. 302 p. Disponível em:

<http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_pnla/_arquivos/sqa_3.pdf>. Acesso em 08 mar 2018.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4.ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2009. 943p.

TUNDISI, José Galizia. **Desafios atuais e futuros para garantir a qualidade da água dos mananciais do município e da Região Metropolitana de São Paulo**. Mananciais : uma nova realidade? / organização MarussiaWhately...[et al.]. -- São Paulo : Instituto Socioambiental, 2008. p.83-98.

TUNDISI, J. G. & MATSUMURA TUNDISI T. **Limnologia**. Oficina de Textos Editora 632. PP. 2008.

TUNDISI, José Galizia. **Água no século 21: enfrentando a escassez**. RiMa/IIE, 2003. 247p.

TUNDISI, José Galizia. **Recursos Hídricos**. Instituto Internacional de Ecologia. 2003. São Carlos, SP. Revista Multiciência, Edição 1. Disponível em: <https://www.multiciencia.unicamp.br/artigos_01/A3_Tundisi_port.PDF>. Acesso em: 20 mar. 2016.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **EarthExplorer**. 2016. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 01 abr. 2016.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **What are the band designations for the Landsat satellites?**. [201-]. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>>. Acesso em: 01 abr. 2016.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **What is pan-sharpening and how can I create a pan-sharpened image?** [201-]. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/what-pan-sharpening-and-how-can-i-create-pan-sharpened-image>>. Acesso em: 01 abr. 2016.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **LANDSAT 8 (L8) DATA USERS HANDBOOK**. 2016. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>>. Acesso em: set. 2016.

VALDERRAMA, J. C., 1981. **The simultaneous analysis of total nitrogen and phosphorus in natural waters**. *Marine Chemistry*, 10: 109-122.

VIRGÍLIO, L.R.; SUSÇUARANA, M.S.; RAMALHO, W.T.; AFFONSO, A.G.; ANDERSON, L.O.; BROWN, I.F. Resposta espectral dos índices EVI e NDVI dos bancos de macrófitas em lagos de meandro abandonado na região do Rio Purus, AM. In: Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 2013, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2013, INPE. Artigos, p. 3183-3190. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p1074.pdf>>. Acesso em: 01 out. 2016.

VON SPERLING, M. 2005. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Vol. 1, 3ª edição, DESA, Ed. UFMG.

WENGRAT, Simone. **Biodiversidade e distribuição das diatomáceas no Complexo Billings, São Paulo: influência da compartimentalização espacial e do estado trófico**. 2011. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Biodiversidade Vegetal e Meio Ambiente, Instituto de Botânica da Secretaria do Meio Ambiente, São Paulo, 2011.

WENGRAT, S.; BICUDO, D. C.. Spatial evaluation of water quality in an urban reservoir (Billings Complex, southeastern Brazil). **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 23, n. 2, p. 200-216, 2011.

WHATELY, Marussia; FERRARA, Nicolau Luciana; SANTORO, Paula Freire. **Mananciais: diagnóstico e políticas habitacionais**. São Paulo: Instituto Socioambiental, 2009. Disponível em: <https://www.socioambiental.org/banco_imagens/pdfs/10368.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2016.